INTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

ESTUDO DAS RESPOSTAS DE TLD TIPO LiF PARA CARACTERIZAÇÃO DE CAMPOS MISTOS

FABIO DE PAIVA

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Reatores.

Orientador:
Prof. Dr. PAULO T.D. SIQUEIRA

SÃO PAULO
2016

Dedico esse trabalho aos Meus Pais, José Simões de Paiva e Maria das Graças de Paiva, a minha esposa Cinara Paiva e até então meu único filho Joseph Abner.

NÃO BUSCO SER O MELHOR, GOSTO DA IDEIA DE SER O MAIS ESFORÇADO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, o originador da vida e da estrutura da matéria com os segredos que guardam, e que na sua bondade tem permitido ao homem entender uma pequena parte de como organizou essa estrutura.

Agradeço muito aos meus pais José e Maria, cujo grau de instrução não os permitem entender todos os aspectos desse trabalho, mas o entendem como resultado dos seus incentivos aos estudos.

Agradeço a minha amada esposa Cinara Paiva por seu apoio e companheirismo, por abrir mão de seu valioso tempo para me ajudar em vários aspectos desse trabalho.

Sou grato ao meu orientador Dr. PAULO T.D. SIQUEIRA, por seu parecer profissional e ético, por estar a disposição diante de várias consultas e por me guiar no aperfeiçoamento profissional.

Sou grato ao Dr. Tuffic Madi Filho por permitir o uso de seu laboratório e fontes, por colaborar com várias sugestões na elaboração de experimentos para detecção de nêutrons.

Agradeço ao companheirismo de todos os companheiros da sala de bolsistas. Sou ainda muito grato a Tálita Salles por sua disposição em me ajudar inicialmente com o MCNP.

Grato ao Tássio Cavalieri por toda ajuda com as medidas experimentais, elaboração dos experimentos, elaboração de inputs, discussão de ideias e colaboração no desenvolvimento geral em todas as facetas desse trabalho.

Estudo das respostas de TLDs tipo LiF para caracterização de campos mistos.

Fabio de Paiva

RESUMO

A Terapia por Captura de Nêutrons, NCT (*Neutron Capture Therapy*) é uma técnica radioterápica em que a energia útil do tratamento vem da energia liberada em uma reação nuclear e não do feixe primário, como comumente utilizado em outros procedimentos radioterápicos. O Boro, por constituir-se em um elemento de baixa toxicidade e por apresentar um isótopo (^{10}B) com alta seção de choque para a reação $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$ tem sido o elemento mais utilizado nas pesquisas que visam o aprimoramento e a promoção desta técnica, derivando daí o termo BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy*).

Para fins de pesquisa em BNCT foi construída ao longo de um dos extratores de feixes (BH - *Beam Hole*) do reator IEA-R1 uma instalação, onde filtros e moderadores são posicionados entre o núcleo do reator e a posição de irradiação com o objetivo de modular o feixe de irradiação, otimizando a componente útil do feixe, os nêutrons térmicos, e reduzindo os contaminantes, raios gama e nêutrons em outras faixas energéticas. Tem-se realizado estudos visando a implementação de melhorias na caracterização e otimização do feixe obtido nesse arranjo instalado no BH-3. Atualmente a monitoração dos nêutrons é feita através de folhas de ativação, e a componente gama pelo TLD-400. Uma nova metodologia de monitoração tem sido estudada pelo grupo. A referida técnica consiste em usar TLDs de tipos diferentes, ou seja, que possuam sensibilidades distintas aos nêutrons térmicos, em virtude de diferenças na concentração dos isótopos de Lítio. No estudo dessa nova metodologia têm sido usados os TLD-600 e TLD-700. Este trabalho propõe uma metodologia usando o par TLD-100 e TLD-700.

Inicialmente foi verificada a reprodutibilidade das respostas dos TLDs 700, 400 e 100 frente a campos gama puro e campos mistos, gama e nêutron. Campos estes obtidos em arranjos usando fontes de ^{60}Co e $^{241}AmBe$. A partir de simulações usando o

MCNP5 foi projetado e construído um Irradiador de campos mistos, que permitiu expor os dosímetros em campos mistos com diferentes espectros energéticos. As condições criadas no irradiador permitiram verificar, como a resposta do TLD é modificada pelas mudanças no espectro energético de um campo misto gama e nêutrons de baixo fluxo.

O irradiador de campo misto permitiu condições para estabelecer uma relação entre o formato da curva termoluminescente e a composição do campo misto. A relação estabelecida relaciona o fluxo relativo e a razão entre a resposta das duas regiões de interesse dos TLDs 700 e 100.

A partir de campos mistos com condições controladas, esse trabalho permitiu verificar a viabilidade do uso do par de TLD-100 e TLD-700 para monitoração de nêutrons térmicos na instalação de BNCT.

LiF TLD response Study for mixed fields characterization.

Fabio de Paiva

ABSTRACT

Neutron Capture Therapy (NCT), is a radiotherapy technique in which the useful treatment energy comes from the energy released in a nuclear reaction and not from the primary beam, as commonly used in other radiotherapc procedures. Boron, an element of low toxicity presents an isotope (^{10}B) with high cross-section for the (n, α) reaction and therefore has been the element mostly used in research aimed at the improvement and promotion of this technique, deriving hence the term BNCT (Boron Neutron Capture Therapy).

For BNCT research purposes, a facility was built along one of radiation extractors of the IEA-R1 reactor. In this facility filters and moderators are positioned between the reactor core and the irradiation position aiming to modulate the irradiation beam by optimizing the useful component of the beam, thermal neutrons, and reducing it's contaminants, gamma rays and neutrons in higher energy bands. We have conducted studies aimed at implementing improvements in the characterization of and optimization of the beam. Currently, neutron flux monitorion is done through activation foils, and the gamma component by TLD-400.

A new methodology has been studied by the group. The technique consists in using different types of TLD, having different sensitivities to thermal neutrons due to differences in the concentration of lithium isotopes. In the study of this new methodology TLD 600 and TLD-700 have been used. This work presents a series of studies in order to apply a methodology using the TLD-100 and TLD-700 pair. TLDs 700, 400 and 100 responses pure gamma and mixed irradiation fields, obtained in arrangements using a ^{60}Co and AmBe sources, were evaluaterd. MCNP simulations were run in order to both discriminating the radiation components and designing one mixed fields irradiator, which allowed exposing dosimeters in mixed fields with different energy spectra. The conditions created in the irradiator allowed to verify, as the TLD response is modified by changes in the energy spectrum of a mixed gamma neutron fields.

This irradiator provided irradiation conditions so to establish a relationship between the shape of the LiF glow curves and the composition of the mixed field. This work has shown the feasibility of using the TLD-100 and TLD-700 pair for gamma and thermal neutrons monitoration in the BNCT facility.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS ..... **IV**

RESUMO ..... **V**

ABSTRACT ..... **VII**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **XI**

ÍNDICE DE TABELAS ..... **XIV**

1 INTRODUÇÃO **1**

1.1 BNCT 2

1.1.1 Conceitos Teóricos. *3*

1.1.2 Histórico *4*

1.1.3 BNCT- BRASIL *6*

2 OBJETIVOS **6**

3 FUNDAMENTOS **7**

3.1 INTERAÇÃO DO NÊUTRON COM A MATÉRIA. 7

3.1.1 Reação de Espalhamento. *7*

3.1.2 Reação de Absorção. *9*

3.1.5 Reação de Fissão. *11*

3.2 SEÇÃO DE CHOQUE. 11

3.2.1 Seção de Choque Microscópica. *12*

3.2.2 Seção de Choque Macroscópica. *13*

3.3 CLASSIFICAÇÃO DOS NÊUTRONS 13

3.3.1 Nêutrons Térmicos *14*

3.3.2 Nêutrons Epitérmicos *14*

3.3.3 Nêutrons Rápidos *15*

3.4 DETECÇÃO DE NÊUTRONS 15

3.5 DOSIMETRIA TERMOLUMINESCENTE 16

3.5.1 Termoluminescência. *16*

4 MATERIAIS E MÉTODOS **18**

4.1 MCNP5 - MONTE CARLO N-PARTICLE TRANSPORT CODE [29] 18

4.2 DOSÍMETROS TERMOLUMINESCÊNTES. 20

4.2.1 TLD-100 ..... *20*

4.2.2 TLD-700 ..... *21*

4.2.3 TLD-400 ..... *22*

4.3 TRATAMENTO TÉRMICO PRÉ-IRRADIAÇÃO. 23

4.4 IRRADIAÇÃO E LEITURA DOS TLDS. 24

4.5 CICLO DE TRATAMENTO E IRRADIAÇÃO. 27
4.6 FONTES CALIBRADAS. 27
4.6.1 Fontes gama. 28
4.6.2 Fonte gama nêutron. 28
4.7 CAMPOS DE IRRADIAÇÃO. 28
4.7.1 CAMPOS GAMA PURO 29
4.7.2 CAMPOS MISTO GAMA E NÊUTRONS 30
4.8 INSTALAÇÃO DE BNCT JUNTO AO REATOR IEA-R1. 31
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 33
5.1 IRRADIADOR DE CAMPO MISTO GAMA E NÊUTRON 33
5.2 ESTUDO DA REPRODUTIBILIDADE DA RESPOSTA EM CAMPO GAMA PURO. 43
5.3 ESTUDO DA REPRODUTIBILIDADE DA RESPOSTA EM CAMPO MISTO GAMA E NÊUTRON 49
5.4 ESTUDO DA RESPOSTA EM CAMPO MISTO COM DIFERENTES ESPECTROS ENERGÉTICOS. 53
5.4.1 Linearidade das Respostas em campos mistos. 56
5.5 LEVANTAMENTO DA CURVA DOSE RESPOSTA PARA CAMPOS MISTOS 58
5.6 VARIAÇÃO DA RAZÃO ENTRE AS DUAS REGIÕES DE INTERESSE COM A VARIAÇÃO DO FLUXO RELATIVO GAMA E NÊUTRONS. 62
5.7 IRRADIAÇÃO NA INSTALAÇÃO DE BNCT. 65
5.7.1 IRRADIAÇÃO EM BAIXA POTÊNCIA. 66
5.7.2 IRRADIAÇÃO EM ALTA POTÊNCIA 68
6 CONCLUSÃO. 71
7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS. 74
8 BIBLIOGRAFIA 75
ANEXO A: FATOR DE NORMALIZAÇÃO PARA OS TLDS. 79
ANEXO B: REDUÇÃO DAS INCERTEZAS ASSOCIADAS AOS CICLOS DE TRATAMENTO, IRRADIAÇÃO E LEITURA. 83
ANEXO C: INFLUÊNCIA DOS NÊUTRONS NA RESPOSTA LUMINOSA DO TLD-400. 86
ANEXO D: COMPARAÇÃO DA CURVA DOSE E RESPOSTA DO IRRADIADOR 02, COM AS DIFERENTES CURVAS OBTIDAS NO IRRADIADOR 03. 92
ANEXO E: DADOS OBTIDOS NA IRRADIAÇÃO DOS TLDS NA INSTALAÇÃO DE BNCT. 95
ANEXO F: COMPARAÇÃO DAS RESPOSTAS DOS TLDS 100, TLD-400, TLD 600 E TLD-700 QUANDO IRRADIADOS EM UM MESMO CAMPO MISTO GAMA E NÊUTRON. 96
ANEXO G: ESTIMATIVA DE DOSE NÊUTRON USANDO APENAS A SEGUNDA REGIÃO DE INTERESSE DO TLD-100. 99

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. SEÇÃO DE CHOQUE DE CAPTURA RADIOATIVA DO ^{10}B EM FUNÇÃO DA ENERGIA DO NÊUTRON. [25] 12
FIGURA 2. SECÇÃO DE CHOQUE DE CAPTURA DO ^{113}CD [25]..... 14
FIGURA 3. EFEITO TERMOLUMINESCENTE. [3]..... 18
FIGURA 4. SEÇÃO DE CHOQUE DO ^{6}LI EM FUNÇÃO DA ENERGIA DOS NÊUTRONS [33]. 21
FIGURA 5. SEÇÃO DE CHOQUE PARA NÊUTRONS DO ^{7}LI. [33]..... 22
FIGURA 6. FORNOS ELÉTRICOS USADOS NO TRATAMENTO TÉRMICO DOS TLDS. 23
FIGURA 7. MODELO DE LEITORA DE TLD UTILIZADA - HARSHAW 3500..... 24
FIGURA 8. EXEMPLO DE CURVA TERMOLUMINESCENTE DOS TLDS DE LIF PARA UM CAMPO GAMA PURO. 26
FIGURA 9. EXEMPLO DE CURVA TERMOLUMINESCENTE DOS TLDS DE LIF PARA O CAMPO MISTO GAMA NÊUTRON..... 26
FIGURA 10. EXEMPLO DE CURVA TERMOLUMINESCENTE DO TLD DE CAF_2 PARA O CAMPO GAMA PURO OU MISTO. 27
FIGURA 11. ESPECTRO DE EMISSÃO DE NÊUTRONS DA FONTE DE $^{241}AMBE$. [38]..... 28
FIGURA 12. SISTEMA DE IRRADIAÇÃO EM CAMPO GAMA USANDO UMA FONTE DE ^{60}CO. 29
FIGURA 13. DESENHO DAS DUAS PARTES QUE FORMAM O IRRADIADOR 02 [4]. 30
FIGURA 14. ESQUEMA SIMPLIFICADO DA INSTALAÇÃO PARA PESQUISA EM BNCT NO REATOR IEA-R1 [18]..... 32
FIGURA 15. SUPORTE PARA COLOCAR AMOSTRAS NA CESTA DE IRRADIAÇÃO. 32
FIGURA 16. ESTIMATIVA DA VARIAÇÃO DO FLUXO DE NÊUTRONS (TÉRMICOS, EPITÉRMICOS E RÁPIDOS) E DO RAIO GAMA AO LONGO DO RAIO DO IRRADIADOR. VALORES CALCULADOS COM MCNP5. 34
FIGURA 17. VARIAÇÃO DO FLUXO RELATIVO DE NÊUTRONS POR FAIXA DE ENERGIA (VALORES CALCULADOS COM O MCNP5)..... 35
FIGURA 18. DESENHO ESQUEMÁTICO COM AS DIMENSÕES DO IRRADIADOR 03 (OBTIDO NO PROGRAMA VISED) 36
FIGURA 19. REPRESENTAÇÃO DO MCNP PARA O MAPEAMENTO VERTICAL DO FLUXO DE NÊUTRONS DO IRRADIADOR 03 COM A PRESENÇA DOS SUPORTES DE TLDS..... 37
FIGURA 20. RESULTADO DO MCNP PARA O MAPEAMENTO DO FLUXO DE NÊUTRONS NO PLANO EM QUE SE ENCONTRAM OS TLDS NO INTERIOR DO SUPORTE. 38
FIGURA 21. MAPEAMENTO HORIZONTAL DO FLUXO DE NÊUTRONS NO IRRADIADOR 03, COM A PRESENÇA DOS SUPORTES DE TLDS..... 39
FIGURA 22. FOTOS DO IRRADIADOR 03. A) VISTA SUPERIOR COM OS 9 SUPORTES DE TLDS POSICIONADOS. B) VISTA EXTERNA DO IRRADIADOR..... 40

FIGURA 23. RESPOSTA TL MÉDIA OBTIDA COM O 9 TLDS-100 NO IRRADIADOR 03 EM TRÊS POSIÇÕES DISTINTAS. 41
FIGURA 24. RESPOSTA TL MÉDIA OBTIDA COM O 9 TLDS-700 NO IRRADIADOR 03 EM TRÊS POSIÇÕES DISTINTAS. 41
FIGURA 25. RESPOSTA TL MÉDIA OBTIDA COM O 9 TLDS-400 NO IRRADIADOR 03 EM TRÊS POSIÇÕES DISTINTAS. 42
FIGURA 26. RESPOSTA TL INDIVIDUAL DOS TRINTAS TLDS-100 PARA UMA DOSE DE 20 MGY NO ^{60}CO, APRESENTADOS COM A INCERTEZA DA MÉDIA. 43
FIGURA 27. COMPARAÇÃO DE RESPOSTAS INDIVIDUAIS DO TLD-100 EM DIFERENTES IRRADIAÇÕES COM DOSE DE 20 MGY NO ^{60}CO. 44
FIGURA 28. RESPOSTA TL MÉDIA DE 30 TLDS-100 PARA DOSE DE 20MGY NO ^{60}CO EM 10 IRRADIAÇÕES DIFERENTES. 45
FIGURA 29. RESPOSTA TL MÉDIA DE 30 TLDS-700 PARA DOSE DE 20MGY NO ^{60}CO EM 10 IRRADIAÇÕES DIFERENTES. 45
FIGURA 30. RESPOSTA TL MÉDIA DE 30 TLDS-400 PARA DOSE DE 20MGY NO ^{60}CO EM 10 IRRADIAÇÕES DIFERENTES. 46
FIGURA 31. RESPOSTA TL INDIVIDUAL DE TRINTA TLDS-100 PARA UMA ÚNICA IRRADIAÇÃO DE 20MGY NO ^{60}CO. DADOS APRESENTADOS SEM APLICAÇÃO DO FATOR DE NORMALIZAÇÃO. 48
FIGURA 32. RESPOSTA TL INDIVIDUAL DE TRINTA TLDS-100 PARA UMA ÚNICA IRRADIAÇÃO DE 20MGY NO ^{60}CO. DADOS APRESENTADOS COM APLICAÇÃO DO FATOR DE NORMALIZAÇÃO 48
FIGURA 33. RESPOSTAS INDIVIDUAIS DE 27 TLDS-100 EM UMA IRRADIAÇÃO DE 24HS NO IRRADIADOR 02 (SEM APLICAÇÃO DO FATOR DE NORMALIZAÇÃO). 49
FIGURA 34. RESPOSTA MÉDIA DE 27 TLDS 100 EM 4 IRRADIAÇÕES DE 24HS NO IRRADIADOR 02. 50
FIGURA 35. RESPOSTA MÉDIA DE 27 TLDS 700 EM 4 IRRADIAÇÕES DE 24HS NO IRRADIADOR 02. 51
FIGURA 36. RESPOSTA MÉDIA DE 27 TLDS-400 EM 4 IRRADIAÇÕES DE 24HS NO IRRADIADOR 02. 51
FIGURA 37. MÉDIA DE TRÊS TLDS-100 EM TRÊS IRRADIAÇÕES NO IRRADIADOR DE CAMPO MISTO. 54
FIGURA 38. MÉDIA DE TRÊS TLDS-700 EM TRÊS IRRADIAÇÕES NO IRRADIADOR DE CAMPO MISTO. 54
FIGURA 39. MÉDIA DE TRÊS TLDS-400 EM TRÊS IRRADIAÇÕES NO IRRADIADOR DE CAMPO MISTOS. 55
FIGURA 40. MÉDIA DA RESPOSTA DE TRÊS TLDS 100 (ROI-1). 56
FIGURA 41. MÉDIA DA RESPOSTA DE TRÊS TLDS 100 (ROI-2). 56
FIGURA 42. MÉDIA DA RESPOSTA DE TRÊS TLDS 700 (ROI-1). 57
FIGURA 43. MÉDIA DA RESPOSTA DE TRÊS TLDS 700 (ROI-2). 57
FIGURA 44. MÉDIA DA RESPOSTA DE TRÊS TLDS 400. 58

FIGURA 45. CURVAS DE CALIBRAÇÃO DO TLD-100 (ROI-1) PARA NOVE DISTANCIAS. 59
FIGURA 46. CURVAS DE CALIBRAÇÃO DO TLD-700 (ROI-1) PARA NOVE DISTANCIAS. 59
FIGURA 47. CURVAS DE CALIBRAÇÃO DO TLD-400 PARA NOVE DISTANCIAS. 60
FIGURA 48. CURVAS DE CALIBRAÇÃO PARA NÊUTRONS, CONSTRUÍDA A PARTIR DA DIFERENÇA DE RESPOSTA DO ROI-1 DOS TLDS DE LIF. 61
FIGURA 49. A RAZÃO ENTRE ROI-2/ROI-1 DO TLD-100 OBTIDAS NO IRRADIADOR 03.....62
FIGURA 50. A RAZÃO ENTRE ROI-2/ROI-1 DO TLD-700 OBTIDAS NO IRRADIADOR 03.....63
FIGURA 51. RELAÇÃO ENTRE A COMPOSIÇÃO DE DOSE E A RAZÃO ENTRE OS ROIS DO TLD-100, OBTIDAS NO IRRADIADOR 03. 64
FIGURA 52. RELAÇÃO ENTRE A COMPOSIÇÃO DE DOSE E A RAZÃO ENTRE OS ROIS DO TLD-700, OBTIDAS NO IRRADIADOR 03. 64
FIGURA 53. RESPOSTA TL DE DUAS REGIÕES DE INTERESSE DO TLD-100. 66
FIGURA 54. RESPOSTA TL DE DUAS REGIÕES DE INTERESSE DO TLD-700. 67
FIGURA 55. RESPOSTA TL MÉDIA DE SEIS TLD-400. 67
FIGURA 56. RESPOSTA TL PARA DUAS REGIÕES DE INTERESSE DO TLD-100. 68
FIGURA 57. RESPOSTA TL DE DUAS REGIÕES DE INTERESSE DO TLD-700. 69
FIGURA 58. RESPOSTA MÉDIA DO TLD-400. 69
FIGURA 59. MÉDIA DE 30 TLDS EM 10 IRRADIAÇÕES NO ^{60}CO. 84
FIGURA 60. MÉDIA DE 30 TLDS 400 EM 10 IRRADIAÇÕES NO ^{60}CO. 84
FIGURA 61. DESENHO ESQUEMÁTICO DO POSICIONAMENTO DA FOLHA DE CÁDMIO DE DOS TLDS. FIGURA OBTIDA COM O PROGRAMA VISED. 86
FIGURA 62. INFLUÊNCIA DO CÁDMIO NO FLUXO DE NÊUTRONS TÉRMICOS INCIDENTE NO TLD-400. 87
FIGURA 63. COMPARAÇÃO DA RESPOSTA MÉDIA DE 3 TLDS 400 PARA CONDIÇÃO COM E SEM A FOLHA DE CÁDMIO. 89
FIGURA 64. COMPARAÇÃO ENTRE ATENUAÇÃO NA DOSE DEPOSITADA POR FÓTONS (SIMULADO) COM A ATENUAÇÃO NA RESPOSTA DO TLD-400, PROVOCADO PELO CÁDMIO. 90
FIGURA 65. COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE CALIBRAÇÃO PARA NÊUTRONS, OBTIDAS NO IRRADIADOR 02 E 03. 92
FIGURA 66. RESPOSTA MÉDIA DE TRÊS TLDS EM TRÊS IRRADIAÇÕES NO IRRADIADOR 03. 99
FIGURA 67. CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA O ROI-2 DO TLD-100 OBTIDA NO IRRADIADOR 03. 100

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA-1. VALORES DA PERDA MÉDIA DE ENERGIA [24]. 9
TABELA- 2. INTERVALOS DE CONFIANÇA DO MCNP5 PARA OS VALORES DO ERRO RELATIVO. 20
TABELA-3. PARÂMETROS UTILIZADOS NA LEITORA DE TLD. 25
TABELA- 4. REGIÕES DE INTERESSE DEFINIDAS PARA CADA TIPO DE TLD. 25
TABELA 5. VALORES DO KERMA NO AR PARA O CAMPO GAMA PURO (^{60}CO) E PARA O CAMPO MISTO GAMA E NÊUTRON (AMBE). 52
TABELA 6. COMPARAÇÃO DA RESPOSTA TL MÉDIA DOS TLDS DE LIF PARA IRRADIAÇÕES FEITAS NO ^{60}CO E NO AMBE. 52
TABELA 7. TAXA DE REDUÇÃO MÉDIA NAS RESPOSTAS DOS TLDS. 55
TABELA 8. PARÂMETROS DA CALIBRAÇÃO LINEAR PARA VALORES APRESENTADOS NA FIGURA 48. 61
TABELA 9. FATORES DE NORMALIZAÇÃO DO TLD-400 81
TABELA 10. FATORES DE NORMALIZAÇÃO DO TLD-100. 80
TABELA 11. FATORES DE NORMALIZAÇÃO DO TLD-700. 82
TABELA-12. RAZÃO ENTRE AS DUAS REGIÕES DE INTERESSE PARA OS TLDS DE LIF EM QUATRO DISTANCIAS NO IRRADIADOR 03. 93
TABELA-13. REPOSTAS LUMINOSAS PARA AS DUAS REGIÕES DE INTERESSE (ROI), PARA 24HS DE IRRADIAÇÃO NOS IRRADIADORES 02 E 03. 93
TABELA- 14. FLUXO MÉDIO CALCULADO NOS TLDS DE LIF NAS RELATIVAS POSIÇÕES NO IRRADIADOR 02 E NA POSIÇÃO 5,1 CM DO IRRADIADOR 03. 94
TABELA 15. RESPOSTA MÉDIA DE SEIS TLDS EM UMA IRRADIAÇÃO NA INSTALAÇÃO DE BNCT. POTÊNCIA DE OPERAÇÃO DO REATOR, 100 KW. 95
TABELA 16. RESPOSTA MÉDIA DE TRÊS TLDS EM UMA IRRADIAÇÃO NA INSTALAÇÃO DE BNCT. POTÊNCIA DE OPERAÇÃO DO REATOR, 4,5 MW. 95
TABELA-17. RESPOSTA MÉDIA DE 30 TLDS PARA QUATRO IRRADIAÇÕES NO CAMPO MISTO GAMA E NÊUTRONS. 96
TABELA-18. FRAÇÃO DA DOSE ABSORVIDA EM RELAÇÃO À DOSE TOTAL DEPOSITADA EM CADA TIPO DE TLD. 97
TABELA-19. PORCENTAGEM DE CADA FAIXA DE ENERGIA, NA CONTRIBUIÇÃO NA DOSE TOTAL DE NÊUTRONS. 97
TABELA 20. PARÂMETROS DA CALIBRAÇÃO LINEAR DO ROI-2, TLD-100. 100

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho visa colaborar no desenvolvimento de uma alternativa ao tratamento de câncer, trata-se de um tipo de radioterapia menos nociva ao paciente, e que pode ser administrada em tumores localizados em regiões como cabeça e pescoço. Esse tipo de radioterapia é conhecida como BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy).*

Uma grande vantagem deste tipo de radioterapia é o tratamento localizado, pois a deposição da radiação é feita seletivamente nas células tumorais, diferentemente da radioterapia convencional onde células saudáveis também são irradiadas junto as células cancerígenas, células estas que determinam a formação de tumores ao crescerem rápidas e desordenadamente em órgãos ou tecidos [1].

A eficiência no tratamento de tumores cancerígenos está associada a precocidade em que é descoberto, o tipo de tumor e sua localização. Cada tipo de tumor necessita de um tipo de tratamento específico, o que obrigou o desenvolvimento de vários métodos de tratamento. Os esforços no desenvolvimento de tratamento do câncer ainda devem ser ampliados frente às estimativas, que apontam para uma carga global de 21,4 milhões de novos casos, com 13,2 milhões de mortes por câncer em 2030. Para o Brasil as estimativas são de 600 mil novos casos de câncer para o biênio 2016-2017 [2].

Se por um lado há avanço do número de casos, por outro, há o desenvolvimento de novos tratamentos bem como melhorias nos procedimentos atuais. Neste cenário, as instituições de pesquisa, que estudam opções de tratamento para o câncer, têm a perspectiva de aumentarem a eficácia dos tratamentos de combate ao câncer. Esse trabalho visa colaborar na luta contra o câncer por contribuir para o desenvolvimento da pesquisa em BNCT, que é um tipo de radioterapia que utiliza um feixe de nêutrons térmicos para o tratamento de tumores cancerígenos. Esse tipo de terapia tem um grande potencial para tratamentos de tumores em regiões com dificuldades para extração cirúrgica ou dificuldades para tratar com a radioterapia convencional.

O feixe de nêutrons utilizado neste trabalho para o estudo em BNCT, foi obtido em um dos extratores de feixe do reator IEA-R1/IPEN-SP. O avanço das pesquisas usando esse feixe depende de se adequá-lo, e caracterizá-lo corretamente, uma vez que o feixe obtido é um feixe misto de nêutrons e radiação gama.

A caracterização do feixe de radiação, atualmente é feita utilizando detectores de nêutrons e gamas. No monitoramento de nêutrons, utiliza-se comumente folhas de ativação, com respostas diferenciadas para as diversas faixas de energia do feixe de nêutrons. Para a monitoração da componente gama utilizou-se o TLD-400 que apresenta baixa resposta para nêutrons.

Em trabalhos recentes estudou-se a possibilidade do uso do par TLD-600 e TLD-700 como metodologia de monitoração do feixe [3] [4]. Estes TLDs são utilizados aos pares, TLD-600 e TLD-700, pois possuem sensibilidades distintas a um dos componentes do feixe (nêutrons térmicos) em virtude das diferenças na concentração dos isótopos de Lítio. De maneira similar este trabalho visa a monitoração dos nêutrons térmicos utilizando o par de TLD-100 e TLD-700, visando a diminuição das incertezas nas medidas obtidas utilizando o par TLD-600 e TLD-700.

A continuação dos trabalhos usando TLDs para caracterização do feixe extraído na instalação de BNCT junto ao Reator é justificado por:

Esses detectores (TLD) são pequenos podendo ser usados no interior do BH (*Beam Hole*);

Os TLDs possuem sensibilidade a nêutrons e aos fótons;

Não necessitam de cabos ou associar instrumentação eletrônica durante as medidas e;

Podem ser reutilizados por várias vezes, mesmo com certo tempo de uso.

Os resultados obtidos nesse trabalho contribuíram para verificar a viabilidade do emprego de uma metodologia de caracterização do feixe misto gama e nêutron, usando o par TLD-100 e TLD-700.

1.1 BNCT

Alguns tumores como Gliomas de alto grau, metástases cerebrais de melanoma de cabeça e pescoço e câncer de fígado podem ser tratados com base na energia obtida na reação nuclear sofrida pelo ^{10}B, quando este é irradiado por um feixe de nêutrons térmicos. A Terapia por Captura de Nêutrons, NCT (*Neutron Capture Therapy*) é uma técnica radioterápica em que a energia útil para o tratamento vem da energia liberada numa reação nuclear e não do feixe primário, como ocorre na radioterapia

convencional [5]. Quando esta técnica radioterápica obtém a energia útil da reação $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$, esta técnica é referida como BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy*).

1.1.1 Conceitos Teóricos.

Os tratamentos radioterápicos convencionais têm sido ineficazes no tratamento de gliomas de alto grau, em especial de glioblastoma multiforme, devido à dificuldade de irradiar o tumor, pois as células do glioma acometem todo o cérebro [6].

No tratamento de glioma de grau elevado, onde primeiro se remove o tumor e após se administra a BNCT, tem-se obtido bons resultados, com sobrevivência significativa a comparar com o tratamento padrão, o que aponta para a BNCT como uma eficiente modalidade de tratamento [7]. Teoricamente a BNCT se mostra superior às técnicas convencionais por destruir seletivamente as células tumorais, visto que o efeito do tratamento ocorre nas células que absorveram o Boro, ou seja, nas células tumorais. Tais características tem tornado a BNCT interessante para tratamentos de gliomas de alto grau, metástases cerebrais, melanoma cutâneo, câncer de fígado e cabeça pescoço [8].

A técnica de BNCT pode ser dividida em duas etapas principais. A primeira consiste em administra-se um composto borado ao paciente que irá se concentrar preferencialmente nas células tumorais. Na segunda etapa a região de tratamento deve ser irradiada com nêutrons térmicos para a promoção da reação desejada. Com a irradiação do ^{10}B por nêutrons térmicos ocorre reação nuclear $^{10}B(n, \alpha)^{7}Li$ onde são liberadas partículas energeticamente carregadas, o átomo de Lítio (^{7}Li) e a partícula alfa.

Essa reação pode ocorrer de duas maneiras: Equação 1.1

$$^{10}B + n_{th} \rightarrow {}^{11}B \begin{cases} \alpha + {}^{7}Li \quad Q = 2{,}79 \quad \text{MeV (6\%)} \\ \alpha + {}^{7}Li^{*} \quad Q = 2{,}31 \quad \text{MeV (94\%)} \end{cases} \qquad [1.1]$$

$$^{7}Li^{*} \rightarrow \gamma\,(E = 0{,}48\text{MeV}) + {}^{7}Li$$

Em 94% das reações as partículas alfas são emitidas com energia de 1,47 MeV e o átomo do ^{7}Li com 0,84 MeV de recuo. Neste caso é emitida radiação gama com energia característica de 0,48 MeV.

Os produtos obtidos na reação acima têm alto LET (*Linear Energy Tranfer*) e possuem um alcance máximo no tecido de 8,8 μm (α) e 4,8 μm (^{7}Li). Essas partículas destroem as células tumorais à medida que depositam sua energia no interior da célula [9]. Por esta razão a BNCT pode ser considerada uma técnica micro-radio-terápica.

O êxito dessa técnica depende de dois aspectos principais:

Primeiro: O boro (^{10}B) precisa ser depositado preferencialmente nas células tumorais. Esta deposição é realizada por um composto borado que deve ter afinidade com as células tumorais, que são as células alvos do tratamento. O boro ainda precisa ter um tempo de residência nestas células igual ou superior ao tempo de tratamento, ou seja, durante a administração da irradiação com nêutrons.

Segundo: A região tumoral deve ser irradiada por um feixe de nêutrons térmicos para a promoção da reação desejada. Como as células tumorais devem ser submetidas a uma fluência de $10^{12} - 10^{13}$ nêutrons térmicos/cm^2, é desejável que o fluxo de nêutrons seja da ordem de 10^9 $n_{th}.s^{-1}$, para que o tempo de máximo de irradiação de um tratamento seja da ordem de 1 hora [9].

Do citado acima, nota-se que para o correto funcionamento da BNCT, as células tumorais devem conter no seu interior uma quantidade suficiente de (^{10}B), ao mesmo tempo em que estas são irradiadas por um feixe de nêutrons térmicos.

No procedimento da BNCT existem algumas dificuldades relacionadas ao fármaco utilizado e aos procedimentos. Por exemplo, os dois principais carregadores de Boro utilizados atualmente, o Borocaptato de Sódio, BSH, e a Boronofenilalanina, BPA, ainda apresentam dificuldades para manter a concentração de Boro em 20mg/g tumor, o que corresponde ao suficiente para atingir as doses terapêuticas de radiação com mínima toxidade [10]. Outro exemplo seria a dose de radiação fora do tecido alvo, oriunda das várias interações dos nêutrons térmicos com os elementos do tecido, como pode ocorrer na interação com o Hidrogênio abundantemente presente nos tecidos.

1.1.2 Histórico

Em 1936 Gordon L. Locker, pesquisador do Instituto Bartol em Swarthmore, Pensilvania – USA, propôs o princípio da Terapia de Captura de Nêutrons pelo Boro.

Apontando para o fato de que se as células tumorais contivessem Boro (^{10}B) no mesmo instante em que fossem expostas aos nêutrons térmicos, estas receberiam taxas de doses suficientes para o tratamento, ao passo que os tecidos sadios circunvizinhos seriam pouco afetados. [5]

Os estudos clínicos desenvolvidos eram aplicações em tumores cerebrais, principalmente o Glioblastoma multiforme (GBM). A partir dessa ocasião houve uma crescente busca, por um composto de boro, que favorecesse a seletividade [5].

Em 1951, W. H. Sweet demonstrou que o composto químico BORAX tinha capacidade de se concentrar em células tumorais [11]. Entre 1951 e 1961 45 pacientes, distribuídos pelos Hospital Geral de Massachusetts (MGH), o Laboratório Nacional de Brookhaven (BNL) e no Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), foram submetidos a BNCT. [12]

A ineficácia da BNCT nessa ocasião deu-se pela falta de seletividade das células tumorais pelo fármaco contendo ^{10}B, que em relação ao tecido sadio ficou em 1:1. A alta concentração do Boro 10 resultou em altas doses, algo próximo a 100 Gy. Os estudos clínicos demonstrando falhas no sistema vascular cerebral, resultante das altas doses, associou BNCT à redução no tempo de sobrevida. Em 1961 nos Estados Unidos, foi feita a última irradiação clinica utilizando a BNCT, usando o fármaco mencionado acima [12].

Em 1960, no Japão, o Dr. Hiroshi Hatanaka iniciou uma série de estudos clínicos com a BNCT, no Instituto de pesquisa de Shionogi, utilizando um novo composto químico, o $Na_2B_{12}H_{11}SH$, conhecido como BSH, apresentando uma seletividade de 1:3 na relação sangue-tumor. Com o novo fármaco foram tratados mais de 140 pacientes com variedade de tumores cerebrais em diversos estágios [8] [13] [11].

Em 1988, o Centro Médico de New England/Harvard juntamente com o MIT criou um novo programa de pesquisas clínicas, em BNCT, que de um modo geral foi dividida em três partes: Analisar a toxicidade máxima tolerada pelo tecido tratado, definir qual a dose máxima necessária para a necrose de células tumorais e verificar a dose máxima tolerável pelo tecido sadio em relação a dose de controle do tumor [14] .

Em 1994 o Laboratório Nacional de Brookhaven (BNL) em uma primeira tentativa, usou feixes de nêutrons epitérmicos, para tratar pacientes em um reator de pesquisas adaptado para fins médicos [15] [12].

Em 1996 o MIT também realizou uma tentativa em BNCT para tratar o caso de um melanoma cutâneo e glioblastoma ou melanoma intracranial [14]. Em 1997, na Holanda, em Petten, foram iniciados os estudos clínicos para tratamento de GBM [9].

1.1.3 BNCT- BRASIL

Em meados da década de 90, houve a tentativa de formação de um grupo de pesquisa em BNCT no IPEN/CEN [16], culminando na construção de uma instalação de pesquisa em BNCT usando um dos extratores de feixe (*BH - Beam Hole*) do reator de pesquisa IEA-R1/IPEN-SP [17].

A elaboração dessa instalação tem por objetivo realizar pesquisas na área de física das radiações e radiobiologia. Atualmente o IPEN/CEN mantém pesquisas na instalação BNCT, trabalhando na caracterização de campos de radiação (nêutrons e gamas) adequado para pesquisa em BNCT. [18] [19] [4]

Também foram realizados estudos biológicos in vitro e in vivo em parceria com o INSTITUTO BUTANTAN [20] e pesquisas em dosimetria com a UNICAMP [21], que possibilitarão a otimização do feixe obtido na instalação de BNCT.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para caracterização do feixe de irradiação, junto ao grupo de pesquisas em BNCT, a partir do par: TLD-100 e TLD-700.

O feixe de irradiação obtido na instalação de BNCT é um feixe misto constituído por nêutrons térmicos, epitérmicos, rápidos e radiação gama. Atualmente a monitoração do feixe é feita usando os pares de TLD-700 e TLD 600. A fim de melhorias na técnica de monitoração do feixe de nêutrons em campos mistos, busca-se uma nova metodologia utilizando o par TLD-700 e TLD-100. Embora o TLD-100 também contenha o ^{6}Li, sua a concentração é menor, sendo suficiente para a intensidade dos feixes estudados, evitando a auto saturação da resposta em alto fluxo.

Para dosimetria TL em campos mistos, depende-se de um melhor entendimento do funcionamento dos TLDs em campos mistos. Por isso esse trabalho também teve como objetivo projetar e construir um irradiador de campos mistos que

permitisse obter um campo misto com diferentes relações entre nêutron e gama para verificar como a resposta dos TLDs são afetadas por diferenças no espectro energético dos nêutrons e por diferenças no fluxo relativo entre radiação gama e nêutrons.

A partir de simulações com o código de transporte de radiação, MCNP5, foi possível construir o irradiador e analisar a influência das variações do campo misto na resposta dos TLDs.

3 FUNDAMENTOS

3.1 Interação do Nêutron com a Matéria.

A ausência de carga no nêutron faz com que sua interação com campos elétricos seja desprezível. Por sua vez a interação com a matéria se dá por meio de interações com o núcleo atômico. A interação dos nêutrons com o núcleo atômico ocorre por meio da força nuclear forte, que tem alcance da ordem de 1fm. Essas características permitem aos nêutrons percorrer consideráveis distâncias no interior de um material sem interagir com os átomos do material até que entre no alcance da força nuclear forte de algum núcleo atômico [22].

As interações nucleares induzidas por nêutrons podem ser classificadas em dois grandes grupos: Reações de Espalhamento (I) e Reações de Absorção (II) [23].

I Reação de Espalhamento:

Espalhamento Elástico

Espalhamento Inelástico

II Reação de Absorção:

Reação de Captura Radioativa (n, y)

Reação de Captura com Ejeção (n, p) (n, α)

Reação com Fissão

3.1.1 Reação de Espalhamento.

A interação do nêutron por meio do Espalhamento Elástico ou do Espalhamento Inelástico produz o mesmo resultado final, a redução da energia dos nêutrons.

3.1.1.1 Espalhamento Elástico.

No espalhamento Elástico a interação entre o nêutron e o núcleo causa variação na energia cinética do nêutron. Se a energia cinética do nêutron for muito superior à energia cinética média dos núcleos do meio, pode-se supor que o nêutron estaria colidindo em um primeiro momento, com os núcleos parados, perdendo parte de sua energia. Com um grande número dessas colisões o nêutron tende a perder energia entrando em equilíbrio térmico com o meio. O espalhamento Elástico predomina em meio constituído por núcleos leves e os nêutrons são de baixa energia.

Os nêutrons que estão em equilíbrio térmico estão numa faixa de energia onde são denominados de nêutrons térmicos, sendo que sua distribuição em energia é dada pela distribuição de Maxwell-Boltzmann com um máximo em 0,025 eV à temperatura ambiente. [24]

$$\overline{E}_{th}=3/2\ kT \tag{3.1}$$

Onde k é a constante de Boltzmann e T a temperatura do meio. O número de colisões para reduzir a energia de um nêutron até o valor de E_{th} é dado por um parâmetro chamado perda média logarítmica;

$$\xi = \overline{\ln E_1 - \ln E_2} \tag{3.2}$$

A média de colisões necessárias para reduzir a energia de um nêutron de E_1 para E_2 é dada pela razão: [24]

$$\frac{\ln E_1 - \ln E_2}{\xi} = 1 \tag{3.3}$$

A Tabela 1 apresenta valores de ξ para alguns nuclídeos.

Tabela-1. Valores da perda média de energia [24].

Material	**Número de Massa**	**ξ**
Hidrogênio	**1**	**1,000**
Deutério	**2**	**0,725**
Hélio	**4**	**0,425**
Lítio	**7**	**0,268**
Carbono	**12**	**0,158**
Oxigênio	**16**	**0,120**

3.1.1.2 Espalhamento Inelástico

No espalhamento inelástico o núcleo alvo não sofre mudança na sua composição isotópica, porém este é deixado no estado excitado. Neste caso o nêutron transfere sua energia para o núcleo.

Essa reação é considerada uma reação (n, n´), onde o núcleo alvo é deixado em um estado excitado e decai emitindo outro nêutron com energia menor. Parte da energia do nêutron incidente aparece como energia de excitação do núcleo alvo que é emitida na forma de raio gama.

O espalhamento inelástico é predominante quando o meio é constituído por núcleos pesados e os nêutrons possuem alta energia.

3.1.2 Reação de Absorção.

3.1.4.1 Captura Radioativa (n, y)

Nesse tipo de reação, quando o nêutron incide sobre o núcleo alvo ele é absorvido formando um núcleo composto em estado excitado, emitindo o excesso de energia como radiação gama.

Esta reação está representada na equação (3.4)

$$ {}^{A}_{Z}X + {}^{1}_{0}n \rightarrow \left[{}^{A+1}_{Z}X \right]^{*} \rightarrow {}^{A+1}_{Z}X + \gamma \qquad (3.4) $$

Embora esta reação esteja descrita apenas para um raio gama, em geral o núcleo excitado decai para níveis intermediários de excitação até atingir um estado estável de energia interna. Nesse processo pode ser emitido uma série de raios gama em algumas faixas de energia.

Quando o núcleo composto produzido neste tipo de reação nuclear possui excesso de nêutrons pode ocorrer um decaimento β^{-}, acompanhado pela emissão de raios gama. Nesse caso o núcleo final é um elemento diferente do elemento original, como exemplificado com o Cobalto, na equação (3.5)

$$ {}^{59}_{27}Co + {}^{1}_{0}n \rightarrow \left[{}^{60}_{27}Co \right]^{*} \xrightarrow{\beta^{-}(5{,}24\,anos)} {}^{60}_{28}Ni + \gamma \qquad (3.5) $$

3.1.4.2 Reação de Captura com Ejeção

Nesse tipo reação o núcleo composto decai com ejeção de partículas, como por exemplo (n, p) ou (n, α). Embora essa reação normalmente ocorra com nêutrons de alta energia, a reação do Boro (^{10}B) com os nêutrons térmicos, constitui uma exceção. (1.1)

A reação de captura do nêutron pelo Boro (^{10}B) pode ser reescrita simplificadamente (3.6)

$$^{10}_{5}B(n,\alpha)\,^{7}_{3}Li \tag{3.6}$$

3.1.5 Reação de Fissão.

Na Reação de Fissão, o nêutron colide com núcleos fissionáveis, dividindo o núcleo em fragmentos, liberando grande quantidade de energia. Normalmente essa reação ocorre com núcleos pesados cujo equilíbrio de força interna é quebrado com a absorção do nêutron, como ocorre com o Urânio (^{235}U). Esse tipo de reação com o urânio libera, em média, 2,43 nêutrons por núcleo fissionado sendo capaz de liberar cerca de 200 MeV de energia.

3.2 Seção de Choque.

A seção de choque (σ) é uma grandeza que quantifica a probabilidade de cada reação ocorrer. A unidade da seção de choque é o barn (b). Inicialmente essa grandeza estava relacionada primariamente com o tamanho do núcleo alvo, posteriormente verificou-se que à área real apresentada pelo núcleo tem uma importância secundária em comparação à energia do nêutron incidente e à energia do núcleo alvo. Entretanto a seção de choque está relacionada com a área de seção transversal de um núcleo.

Como o raio do núcleo é da ordem de 10^{-12} cm, a unidade de seção de choque 1b é definida como uma área de 10^{-24} cm^2, ou seja, 1b = 10^{-24} cm^2.

Para cada tipo de reação nuclear há um valor de seção de choque, que é dependente da energia do nêutron incidente e do núcleo alvo. A Figura 1 apresenta a variação do valor da seção de choque em função da energia do nêutron.

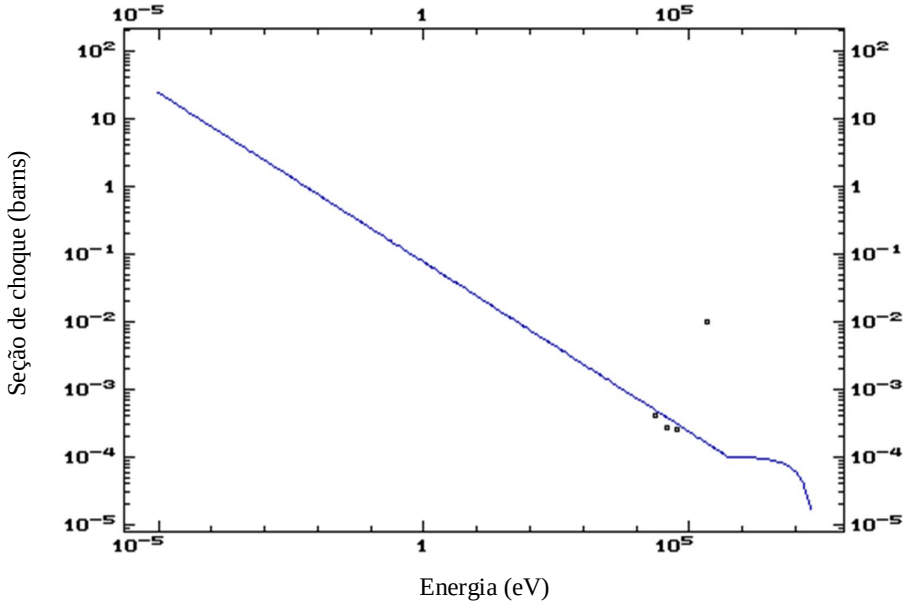

Figura 1. Seção de choque de captura radioativa do ^{10}B em função da energia do nêutron. [25]

A somatória de cada seção de choque relativa a cada reação nuclear compõe a seção de choque total. Portanto, a seção de choque total é a somatória da seção de choque de duas grandes componentes, a seção de choque de espalhamento e a seção de choque de absorção.

$$\Sigma_{total} = \Sigma_{espalhamento} + \Sigma_{absorção} \tag{3.7}$$

3.2.1 Seção de Choque Microscópica.

A seção de choque microscópica expressa a seção de choque para um núcleo individual.

$$\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s \tag{3.8}$$

σ_t = seção de choque microscópica total;

σ_a = seção de choque microscópica de absorção;

σ_s = seção de choque microscópica de espalhamento.

3.2.2 Seção de Choque Macroscópica.

A seção de choque macroscópica é obtida pelo produto da seção de choque microscópica pelo número de total de núcleos contidos em um centímetro cúbico do material alvo.

$$\Sigma = N.\sigma \tag{3.9}$$

A seção de choque macroscópica total de um elemento representa à probabilidade de ocorrer qualquer interação por unidade de comprimento.

3.3 Classificação dos Nêutrons

Os nêutrons são classificados em função de sua energia cinética. Nesse trabalho foi adotado três faixas de energia em que os nêutrons são convencionalmente designados por: Térmicos, Epitérmicos e Rápidos. A

Figura 2 apresenta a seção de choque do cádmio, entre 0,2 eV e 0,3 eV é possível observar o chamado degrau de cádmio, tido como limite entre os nêutrons térmicos e epitérmicos.

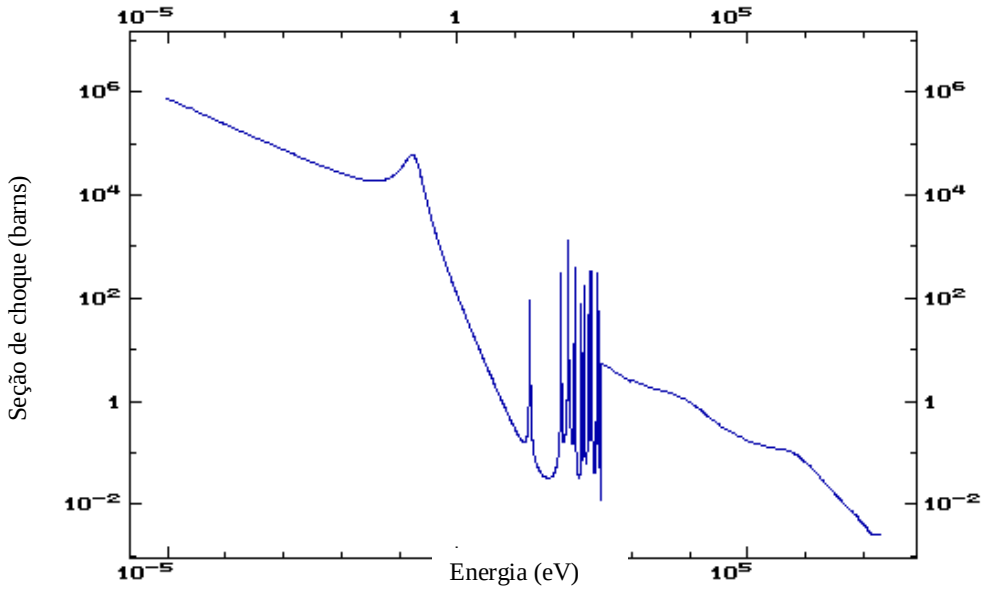

Figura 2. Secção de choque de captura do ^{113}Cd [25].

3.3.1 Nêutrons Térmicos

Os nêutrons térmicos são definidos como os nêutrons que estão em equilíbrio com o meio na temperatura de 300k, que corresponde a uma energia média de 0,25eV.

3.3.2 Nêutrons Epitérmicos

Os nêutrons epitérmicos têm energia maior que 0,25 eV e energia menor que a energia mínima para maioria das reações limiares. Os nêutrons epitérmicos têm energia entre 0,25eV à 100 keV,

Figura 2.

3.3.3 Nêutrons Rápidos

São nêutrons com energia suficiente para iniciar a maioria das reações Limiares. O limite entre nêutrons epitérmicos e rápidos é tido como algo entre 100 e 200 keV.

3.4 Detecção de Nêutrons

As interações físicas do nêutron fazem com que sua detecção seja feita de forma indireta, por meio de materiais conversores. O material conversor possui alta seção de choque para nêutrons. Na interação do nêutron com o material conversor é produzida a radiação ionizante.

Existem alguns tipos de conversores que podem ser: Semicondutores, Gasosos, Cintiladores e Auto-alimentados.

Os dosímetros na forma de ^{6}LiF (TLD), usados nesse trabalho são semicondutores, com o ^{6}Li sendo o conversor na detecção de nêutrons térmicos. O ^{6}Li apresenta seção de choque de 940 barns para nêutrons térmicos e sua reação com os nêutrons térmicos pode ser escrita por:

$$^{6}Li + {}^{1}n \rightarrow {}^{3}H + {}^{4}\alpha + 4{,}78\ MeV. \quad (3.10)$$

Esse tipo de dosímetro (TLD) pode ser usado na detecção de nêutrons mesmo em campos mistos nêutrons e gama, como ocorre normalmente nas fontes de nêutrons, seja essa fonte um reator ou uma fonte de AmBe. O uso de dosímetros termoluminescentes para medidas em campos mistos nêutron e gama, é feita através da combinação de dosímetros de ^{6}LiF e ^{7}LiF. Estes dosímetros apresentam praticamente a mesma resposta para um campo gama puro, mas quando expostos a um campo misto gama e nêutron o ^{7}LiF se apresenta pouco sensível aos nêutrons, portanto sua resposta TL é tida como correspondente somente a componente gama presente no feixe. Por outro lado, o TLD de ^{6}LiF quando exposto a um campo misto gama e nêutron, apresentará um sinal luminoso proporcional a componente gama e aos nêutrons.

A comparação entre a resposta obtida com o dosímetros de ^{6}LiF e de ^{7}LiF permite a separação da componente devido a nêutrons térmicos e radiação gama. Sendo necessário apenas a subtração da resposta do TLD de ^{7}LiF da resposta do TLD de ^{6}LiF.

O valor obtido com a subtração das respostas é relacionado com uma curva de calibração para se obter o valor correspondente em dose.

3.5 Dosimetria termoluminescente

Os dosímetros termoluminescentes (TLDs), usados nesse trabalho são pequenos cristais que, quando aquecidos, emitem um sinal luminoso cuja intensidade é proporcional à dose de radiação absorvida.

3.5.1 Termoluminescência.

Quando alguns semicondutores recebem energia de uma radiação incidente e posteriormente são aquecidos, esses materiais emitem luz num processo conhecido como termoluminescência. O processo de termoluminescência depende de haver um material que absorva a energia devido à radiação, que este seja aquecido para induzir a emissão dessa energia como fótons de luz, ou seja, luminescência. Uma característica importante nos materiais termoluminescentes é que o comprimento de onda da luz emitida é característico do material e não da radiação incidente.

O processo de luminescência é característico por haver um intervalo de tempo entre a absorção da radiação e a emissão de luz (tc). O valor de $tc<10^{-8}$ s é um dos fatores que distingue a fluorescência como um processo natural e espontâneo, da fosforescência, um processo não espontâneo com $tc>10^{-8}$ s [26].

No processo de fluorescência a emissão de luz cessa praticamente junto com a extinção da incidência de radiação. Diferentemente, na fosforescência há um retardamento entre a absorção da radiação e o tempo para emissão de luz.

No emprego dos materiais temoluminescentes como dosímetros, estabelece-se uma relação diretamente proporcional entre a intensidade de luz emitida e a dose depositada no material. Pelo fato dos materiais termoluminescentes emitirem luz proporcionalmente à quantidade de radiação absorvida, estes materiais comumente são utilizados na construção de dosímetros, como o TLD (*thermoluminescent dosemeters*) [27].

3.5.1.1 Modelo simples para a Termoluminescência

O processo de termoluminescência pode ser explicado usando um esquema de níveis de energia. Na rede cristalina do material que compõe o TLD são adicionadas impurezas que geram regiões de armadilhamento de elétrons entre a banda de Condução e a banda de Valencia.

Ao fornecer energia aos átomos que compõem este material, estes podem ser excitados e posteriormente emitir luz no processo de desexcitação. Durante a passagem do estado fundamental para o estado excitado, pode ocorrer a transição para um estado metaestável, conhecido como armadilhamento (Figura 3-a).

Para o sistema retornar ao estado fundamental é necessário fornecer energia ao sistema, o que pode ser feito aumentando a temperatura do material.

O aumento da temperatura aumenta a probabilidade dos elétrons serem liberados das armadilhas para a banda de condução, e a recombinação desses elétrons com os buracos retidos produz a emissão de luz (Figura 3-b).

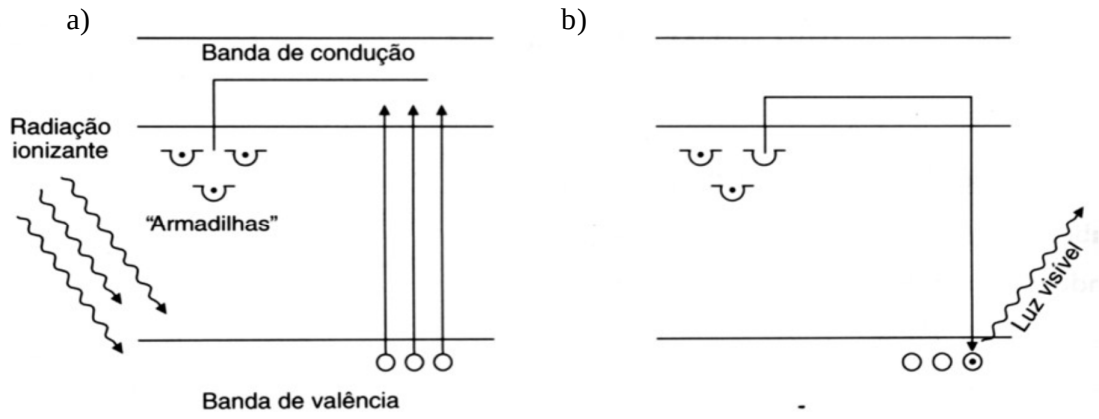

Figura 3. Efeito Termoluminescente. a) A radiação ionizante induz o deslocamento dos elétrons da banda de valência para banda de condução. Ao retornarem da banda de condução esses elétrons podem ficar armadilhados. b) Durante o aquecimento do material os elétrons vão para banda de condução e retornam para banda de valência emitindo fótons. [3]

Quando a radiação interage com os elétrons da banda de valência, esses são transferidos para banda de condução, no retorno da banda de condução ficam armadilhados em um dos níveis energéticos intermediários entre a banda de valência e a de condução. Ao serem aquecidos estes retornam à banda de condução podendo se mover no cristal e recombinar com os buracos da banda de valência emitindo luz [27] [28].

4 MATERIAIS e MÉTODOS

4.1 MCNP5 - Monte Carlo N-Particle transport code [29]

O MCNP é um código de simulação de transporte de radiação, baseado no método de Monte Carlo. Na versão aqui utilizada (versão 5) é possível simular o transporte de nêutrons, gama e elétrons. Para simulação é necessário gerar um arquivo de entrada (input), que pode ser escrito em programa de edição de texto. A simulação gerará de saída, um arquivo de texto (output).

O código permite a simulação de geometrias simples e complexas, com alto nível de detalhamento. O MCNP permite fazer um mapeamento do fluxo das partículas simuladas, discriminando o fluxo por energia ou partícula. Ainda é possível verificar a

contribuição de cada componente do campo na composição da dose depositada e a contribuição ou interferência da geometria seja no fluxo do campo ou na dose.

O arquivo de entrada é divido em três partes, ou três Blocos. No primeiro bloco o usuário edita as células ou volumes. Estes são limitados por superfícies especificadas no Bloco 2. Ainda no Bloco 1 o usuário determina a densidade e o tipo de material que constitui as células.

No Bloco 2 são determinadas as formas geométricas ou superfícies, bem como suas dimensões, que podem ser planos, esferas, cilindros etc. Estas superfícies são usadas para delimitar as células especificadas no Bloco 1.

No Bloco 3, são especificadas todas as outras informações: As características da fonte, a especificação da composição isotópica dos materiais das células apontadas no Bloco 1, tempo de simulação ou número de partículas a serem geradas [30]. É também no terceiro Bloco que se especifica que tipo de informação se está buscando com essa simulação (*Tallies*). Estas podem ser fluxo médio em uma célula, fluxo médio em uma superfície, energia média depositada na célula entre outras.

O resultado apresentado pelo MCNP é acompanhado de um erro relativo, que consiste na precisão estatística como um resultado de uma fração com respeito à média estimada. [31]

$$R = \frac{\sigma}{X_{Média}} \tag{4.1}$$

Do erro estimado formam-se intervalos de confiança referentes à média estimada, obtidos pela distribuição normal. Esses intervalos se referem à precisão estatística dos cálculos envolvidos no Método de Monte Carlo, portanto sua exatidão não se refere aos valores que se obtém em medidas experimentais. A diferença no valor calculado e medido pode estar associado à modelagem, dados físicos utilizados, aproximações ou técnicas de amostragem [29].

A interpretação da qualidade dos intervalos de confiança é feita a partir dos valores de R. As recomendações do MCNP referente ao intervalo do erro relativo estimado são apresentados na Tabela 2. [32]

Tabela- 2. Intervalos de confiança do MCNP5 para os valores do erro relativo.

Intervalo de R	Qualidade do intervalo
0.5 e 1.0	Não aceitáveis
0.2 e 0.5	Não Recomendáveis
0.1 e 0.2	Questionáveis
< 0.1	Geralmente confiáveis.

A versatilidade do código MCNP em resoluções de diferentes tipos de problemas faz com que este seja muito bem aceito na comunidade científica, e amplamente utilizado na resolução de problemas envolvendo transporte de radiação.

Neste trabalho o cálculo de dose depositada por nêutrons e fótons, foi feito utilizando o cartão (*tallies*) F6. A informação de fluxo foi obtida usando o cartão (tallies) F4.

4.2 Dosímetros termoluminescêntes.

Os dosímetros termoluminescentes empregados nesse trabalho são pequenos cristais de LiF e CaF, conhecidos comercialmente como TLDs.

Os TLDs usados nesse trabalho foram obtidos de um lote já utilizado pelo grupo de pesquisa do CEN/IPEN, embora os mesmos já houvessem sido utilizados, estavam bem acondicionados em suportes acrílicos identificados por tipo. Para este trabalho não foi feito um selecionamento, para obtenção de TLD com respostas próximas.

Neste estudo foram utilizados 90 TLDs, sendo: 30 TLDs 100, 30 TLDs 400 e 30 TLDs 700.

4.2.1 TLD-100

O cristal de LiF:Mg,Ti, com os isótopos de Li em suas concentrações naturais, 7,5% de ^{6}Li e 92,5% de ^{7}Li, é conhecido comercialmente como TLD-100. Devido a composição isotópica do Li, esse TLD é mais sensível à radiação gama, porém tem relativa sensibilidade aos nêutrons térmicos devido a presença do ^{6}Li, que apresenta alta seção de choque para nêutrons térmicos,

Figura 4.

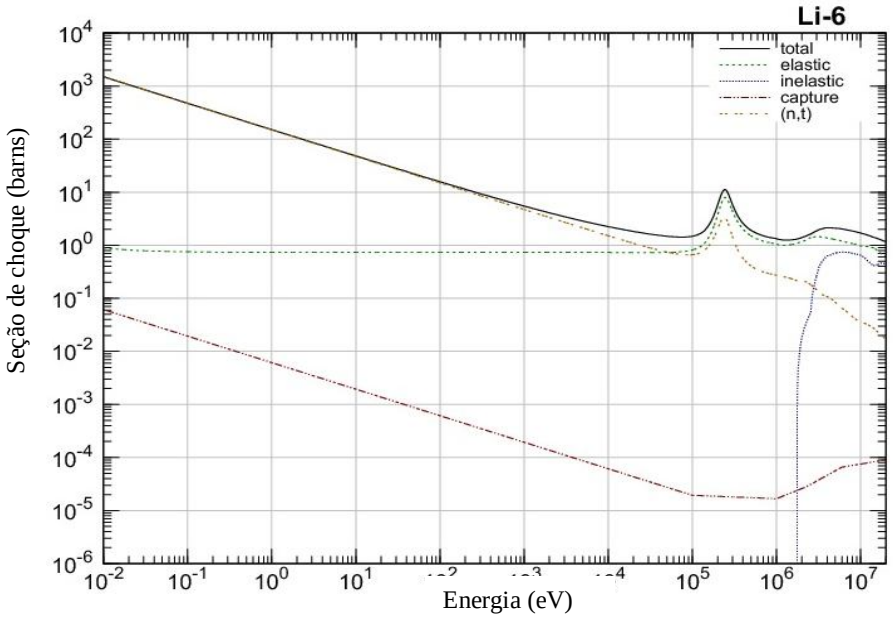

Figura 4. Seção de choque do ^{6}Li em função da energia dos nêutrons [33].

Parte da contribuição de sua termoluminescência é devido à energia liberada na reação 6Li (n,α)^{3}H. As partículas alfa e trítio produzidas nesta reação são geradas respectivamente com energias de 2,07 MeV e 2,74 MeVe, por terem alta taxa de transferência linear de energia (LET - *Linear Trnasfer Energy*), depositam toda a energia no cristal, que responderá por parte da luminescência do cristal.

A metodologia estudada neste trabalho visa a caracterização do campo obtido na instalação de BNCT no Reator- IEA-R1. Levando em consideração o tempo de exposição e a saturação da resposta, essa menor sensibilidade do TLD-100 aos nêutrons, é uma vantagem frente ao TLD 600, que tem uma maior concentração de ^{6}Li e consequentemente mais rapidamente perde a linearidade da reposta. Essa vantagem é uma importante justificativa na substituição do par TLD-700 e TLD 600 pelo par TLD-700 e TLD-100.

4.2.2 TLD-700

O cristal de LiF:Mg,Tg com enriquecimento do isótopo ^{7}Li a 99,93% e 0,07% de ^{6}Li, é conhecido comercialmente como TLD-700. Essa distribuição da concentração dos isótopos de Li o caracteriza como um dosímetro mais sensível à radiação gama e pouco sensível aos nêutrons, devido à baixa concentração de ^{6}Li e pelo fato do ^{7}Li apresentar baixa seção de choque para nêutrons. Figura 5

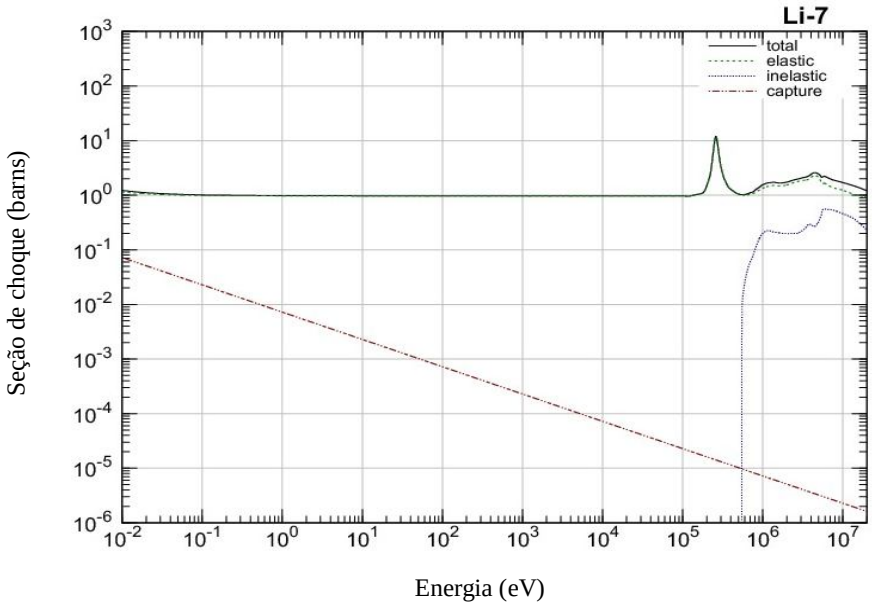

Figura 5. Seção de choque para nêutrons do ^{7}Li. [33]

O TLD-700, apresenta resposta à radiação gama semelhante à resposta do TLD-100 e à do TLD-600, essa característica viabiliza seu uso em campos mistos de gamas e nêutrons. A resposta luminosa do TLD-700 tem pouca contribuição da dose depositada devido aos nêutrons, podendo ser descontada da resposta dos LiFs, com maior sensibilidade a nêutrons, e assim discriminar a dose gama da dose devido a nêutrons.

4.2.3 TLD-400

O cristal de CaF2:Mn, comercialmente conhecido com TLD-400, é muito utilizado na dosimetria gama, tendo pouca sensibilidade aos nêutrons. Foi verificada a reprodutibilidade deste tipo de TLD em campo gama puro e campo misto gama e nêutron. Os dados obtidos com esse tipo de TLD, serviu apenas como parâmetro na dosimetria gama.

4.3 Tratamento Térmico Pré-Irradiação.

Antes dos TLDs serem irradiados, estes eram submetidos a um tratamento térmico. O tratamento térmico é o procedimento de recozimento dos TLDs que visa eliminar possíveis elétrons armadilhados mesmos após a leitura dos dados.

Como o tratamento térmico influencia na resposta luminosa do TLD [34], cada grupo adota uma metodologia fixa de tratamento de acordo com as características do laboratório e tipo de TLD.

Neste trabalho os TLDs foram tratados termicamente no dia anterior à irradiação, segundo o tipo de TLD de acordo com a orientação do fabricante [35].

Os TLD-100 e TLD-700 eram colocados em uma estufa a 400°C por uma hora, em seguida eram transferidos para uma segunda estufa a 100°C por mais duas horas.

Os TLDs 400 eram submetidos apenas à primeira etapa do tratamento térmico, ou seja, eram mantidos a 400°C por uma hora.

Para o tratamento térmico foram utilizados dois fornos elétricos previamente calibrados para as temperaturas 100°C e 400°C, Figura 6.

Figura 6. Fornos elétricos usados no tratamento térmico dos TLDs.

Todos os TLDs eram mantidos na temperatura ambiente após aquecidos na estufa, evitando choques térmicos.

4.4 Irradiação e Leitura dos TLDs.

Para o posicionamento dos TLDs nas montagens experimentais, foram utilizados suportes de isopor ou de acrílico. As dimensões dos suportes de acrílico foram pensadas visando a praticidade do uso e garantindo o equilíbrio eletrônico para as condições de irradiação.

Após a irradiação dos TLDs a leitura dos dados era feita no dia posterior, passado aproximadamente 24 horas entre o término da irradiação e a leitura.

Para a obtenção da curva termoluminescente, foi utilizado a leitora de TLD HARSHAW 3500, Figura 7.

Figura 7. Modelo de leitora de TLD utilizada - Harshaw 3500.

O sinal elétrico fornecido pela leitora foi analisado por um software chamado WinRens, fornecido pelo fabricante da leitora. Esse programa fornece a curva termoluminescente, representando a carga elétrica coletada na fotomultiplicadora em função da temperatura de aquecimento do TLD.

Para o correto funcionamento da leitora, esta depende da fixação de alguns parâmetros, que já haviam sido definidos em trabalhos anteriores, conforme Tabela-3 [4].

Tabela-3. Parâmetros utilizados na Leitora de TLD.

Temperatura inicial	Temperatura final	Taxa de aquecimento	Tempo de Leitura
60°C	400°C	10°C/s	45s

A curva luminosa obtida depende do campo e do tipo de TLD irradiado. Essa curva representa as cargas coletadas, que podem apresentar regiões de picos. A região onde esses picos apresentam maior estabilidade são as regiões de interesse representadas pelos canais (ROI). Foi observado que os picos dosimétricos na maioria das leituras, estavam centralizados nas regiões anteriormente utilizadas pelo grupo. A Tabela 4 apresenta os canais correspondentes a cada região de interesse.

Tabela- 4. Regiões de interesse definidas para cada tipo de TLD.

Tipo	**ROI 1 (canais)**	**ROI 2 (canais)**	**ROI 3 (canais)**
LiF	65 - 110	110 - 155	
CaF_2			90 -145

Os cristais de LiF, TLD-100 e 700, têm curva luminosa semelhante quando irradiados no campo gama puro ou no campo misto gama e nêutron. Os picos obtidos com os cristais de LiF em irradiações no campo gama puro se encontram na primeira região de interesse (ROI 1). A curva termoluminescente tem uma região dosimétrica com resposta predominante, como observado na Figura 8

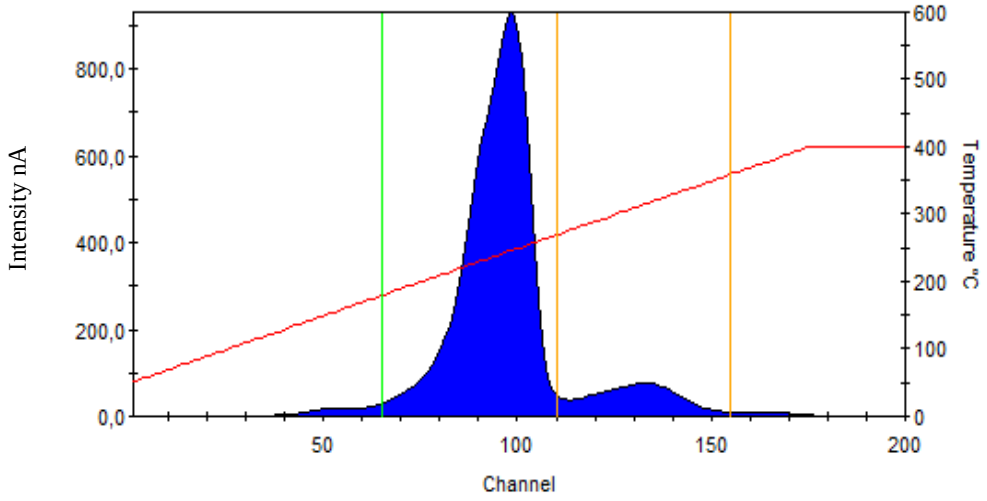

Figura 8. Exemplo de curva termoluminescente dos TLDs de LiF para um campo gama puro.

Os picos obtidos para irradiação em campo misto gama e nêutron se encontram na primeira e segunda região de interesse, respectivamente ROI 1 e ROI 2. A curva termoluminescente possui duas regiões com respostas predominantes, Figura 9.

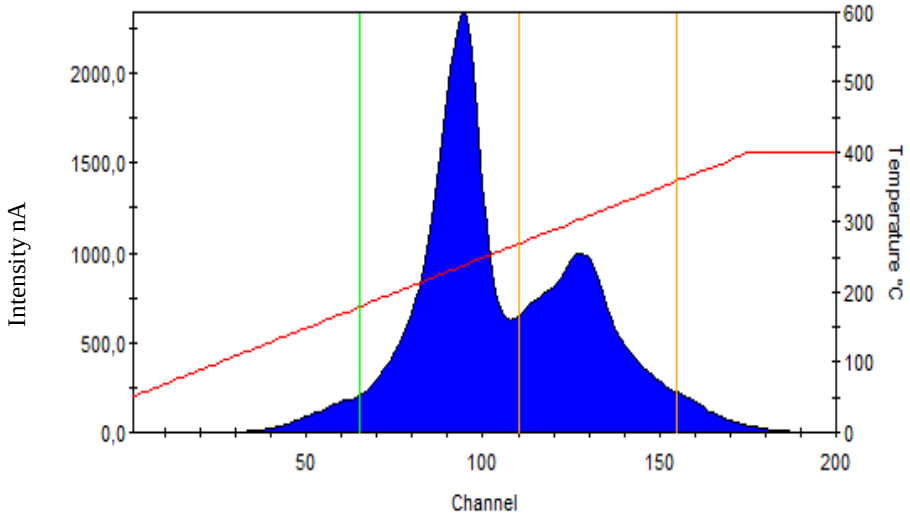

Figura 9. Exemplo de curva termoluminescente dos TLDs de LiF para o campo misto gama nêutron.

Os picos obtidos com o TLD-400 em irradiações em campo gama puro ou campo misto gama e nêutron se encontram na mesma região de interesse (ROI 3). Observa-se apenas uma região dosimétrica de interesse Figura 10.

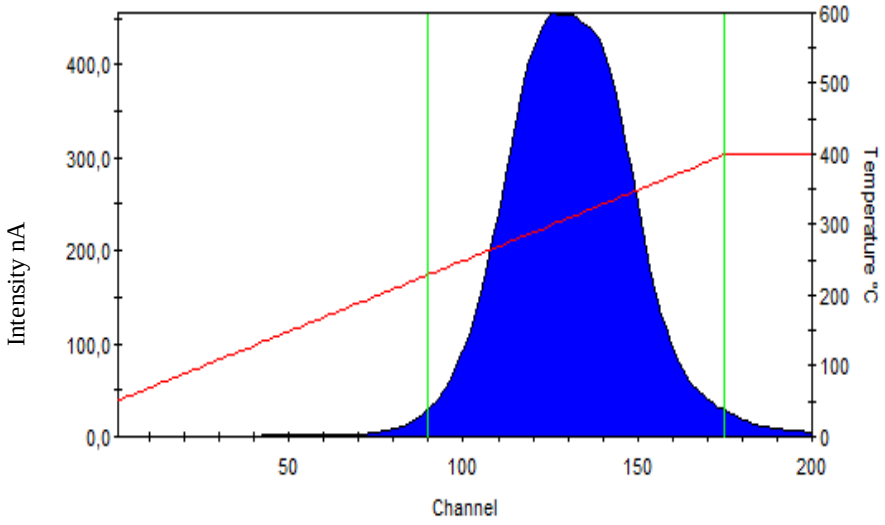

Figura 10. Exemplo de curva termoluminescente do TLD de CaF_2 para o campo gama puro ou misto.

4.5 Ciclo de tratamento e irradiação.

Os procedimentos na obtenção de dados com os TLDs foram feitos dentro de um mesmo ciclo de três dias. No primeiro dia os TLDs recebem o tratamento térmico, no segundo dia estes são irradiados.

A leitura era feita em um terceiro dia, ou seja, 24 horas após o término da irradiação, fechando assim um ciclo entre tratamento, irradiação e leitura. A adoção desse ciclo visava diminuir as incertezas associadas ao processo de obtenção de dados, visto os TLDs apresentarem um esmaecimento pronunciado para as regiões associadas a uma temperatura mais baixa.

4.6 Fontes Calibradas.

Para as montagens experimentais utilizadas neste trabalho, foram usados duas fontes seladas, uma fonte de ^{60}Co e outra de $^{241}AmBe$.

4.6.1 Fontes gama.

Para o estudo da resposta dos TLDs em campo gama, foi utilizado uma montagem experimental no Laboratório de Dosimetria Termoluminescente (LDT/IPEN). Essa montagem utiliza uma fonte de ^{60}Co de 5,46 mCi em junho de 2007. [36] Como o Cobalto emite raios gama com energia 1,17 e 1,33 MeV, nessa montagem foi feito o estudo da resposta dos TLDs frente ao campo gama puro.

4.6.2 Fonte gama nêutron.

Para estudo das respostas do TLD em campos misto gama-nêutron foi utilizada uma fonte de ^{241}AmBe de 2Ci [4]. A fonte de ^{241}AmBe emite um raio gama com energia de 4,4 MeV, [37] e nêutrons basicamente na faixa rápida, Figura 11.

A fonte de ^{241}AmBe foi usada nas montagens experimentais para o estudo da resposta dos TLDs em campos mistos.

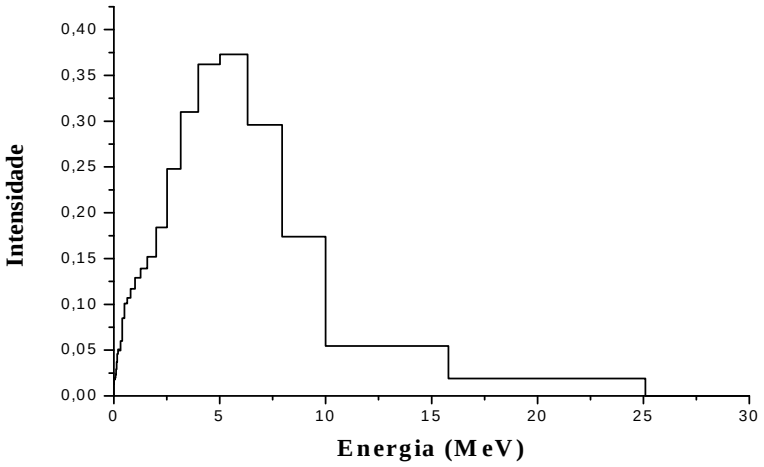

Figura 11. Espectro de emissão de nêutrons da fonte de ^{241}AmBe. [38]

4.7 Campos de Irradiação.

No desenvolvimento do estudo da resposta dos TLDs diante de campo misto gama e nêutron, os dosímetros foram submetidos a campos cujos componentes gama e nêutrons

eram conhecidos. A irradiação em diferentes campos visou o entendimento da resposta destes dosímetros frente às diferentes componentes do campo.

Para discriminação da contribuição das componentes do campo misto na dose total depositada no TLD, foi utilizado o código de transporte MCNP5. Todavia, para que os resultados obtidos por cálculo fossem confiáveis, fez se esforço para que o sistema simulado representasse tão fidedignamente quanto possível o sistema utilizado na irradiação.

Os TLDs foram irradiados em condições de irradiação com níveis de complexidade progressiva, visando o entendimento da resposta obtida na instalação para estudo em BNCT no reator IEA-R1 e consequentemente a caracterização do feixe.

4.7.1 CAMPOS GAMA PURO

O arranjo experimental usado no estudo da reprodutibilidade das respostas dos TLDs frente ao campo gama puro consistia de um suporte para suspender a fonte de Cobalto (^{60}Co) sobre uma mesa, os TLDs foram posicionados ao redor da fonte em suportes de acrílico.

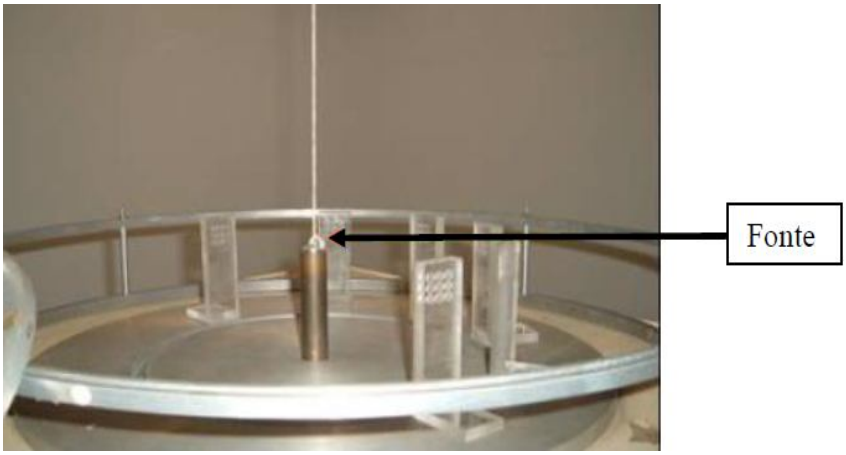

Figura 12. Sistema de Irradiação em campo gama usando uma fonte de ^{60}Co.

Os TLDs foram posicionados nos suportes de acrílico distribuídos numa matriz 3x3 de modo que os TLDs da posição central ficaram na altura média da fonte. A distância entre a fonte e os TLDs era de 15 cm. Nas condições de irradiações desse arranjo os TLDs

foram expostos a 20 mGy de Kerma no ar. Foram feitas 12 irradiações dos 90 TLDs sendo 30 de cada tipo.

4.7.2 CAMPOS MISTO GAMA E NÊUTRONS

O estudo da reprodutibilidade das respostas dos TLDs para campo misto foi feito em uma montagem experimental construída pelo o grupo de BNCT/CEN, [4] aqui referido como Irradiador 02, construído para substituir um primeiro modelo usado pelo grupo para estudos de dosimetria TL em campos mistos, referido como Irradiador 01. [3]

O irradiador 02, utilizado nesta etapa, constituí-se basicamente de um cilindro de polietileno com a fonte de ^{241}AmBe centralizada no seu interior. A fonte foi posicionada na parte interior do cilindro ficando na altura média. Figura 13.

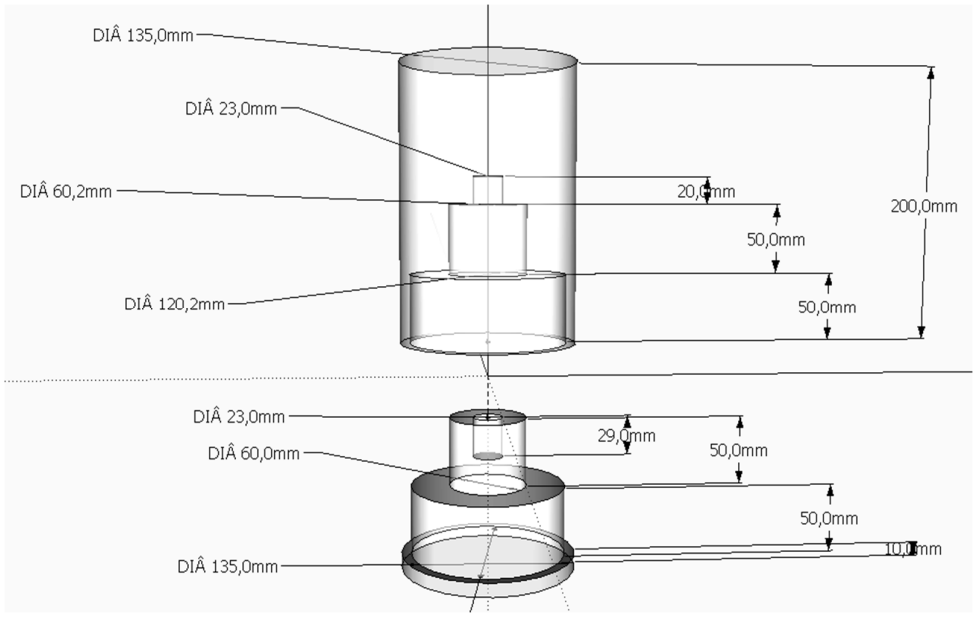

Figura 13. Desenho das duas partes que formam o irradiador 02 [4].

Nesse arranjo os TLDs foram posicionados com suportes de isopor na superfície lateral do cilindro de polietileno, como os TLDs posicionados em torno da altura média, de modo a que os todos os TLDs ficassem sujeitos ao mesmo fluxo e à mesma dose. Nas irradiações nesse sistema cada TLD foi colocado em uma das 15 posições existentes de

um suporte de isopor com distribuição matricial 3 x 5. Foi utilizado um total de 6 suportes para posicionar os TLDs ao redor do cilindro.

Os TLDs de LiF são sensíveis aos nêutrons térmicos, que são emitidos em baixa intensidade pela fonte de ^{241}AmBe. O cilindro de polietileno colocado ao redor da fonte contribui para um significativo aumento do fluxo de nêutrons térmicos incidente no TLDs, uma vez que o polietileno termaliza parte dos nêutrons rápidos emergentes da fonte. A equipe de pesquisa do CEN já tinha algumas medidas no irradiador 02 usando os TLD-700, TLD-600 e TLD-400, nas novas medidas foi usado o TLD-700 e TLD-100 e TLD-400. No estudo da reprodutibilidade em campos mistos, gama e nêutron, usando este irradiador, foram irradiados 90 TLDs sendo 30 de cada tipo, com o tempo de exposição de 24hs em cada irradiação.

O irradiador 02 tem uma característica de homogeneidade de campo para as diferentes posições de irradiação, o que não era observado no irradiador 01, justificando a construção deste segundo modelo.

Este modelo permitiu o estudo de reprodutibilidade em campos mistos, e também verificar a resposta TL de TLDs de tipos diferentes, para um mesmo campo. As características do irradiador 02, não permitiam verificar como variações no fluxo relativo gama e nêutrons, bem como variações no espectro energético dos nêutrons, influenciam na resposta TL. Portanto foi necessário projetar e construir um terceiro irradiador, Irradiador 03, que viabilizasse verificar como essas mudanças no campo influenciaria na resposta TL dos diferentes tipos de TLDs.

4.8 INSTALAÇÃO DE BNCT JUNTO AO REATOR IEA-R1.

Há no IPEN uma instalação para as pesquisas em BNCT junto ao reator IEA-R1. A instalação, construída ao longo de um dos extratores de feixes (*BH - Beam Hole*) do reator IEA-R1. A posição de irradiação da amostra situa-se no interior do BH.

Filtros e moderadores foram posicionados entre o núcleo do reator e a posição de irradiação com o objetivo de modular o feixe de irradiação, i.e., otimizar a componente útil do feixe reduzindo os contaminantes (componente gama e nêutrons de outras faixas energéticas), que incidem sobre a amostra.

A Figura 14 apresenta um esquema simplificado da instalação de pesquisa em BNCT,

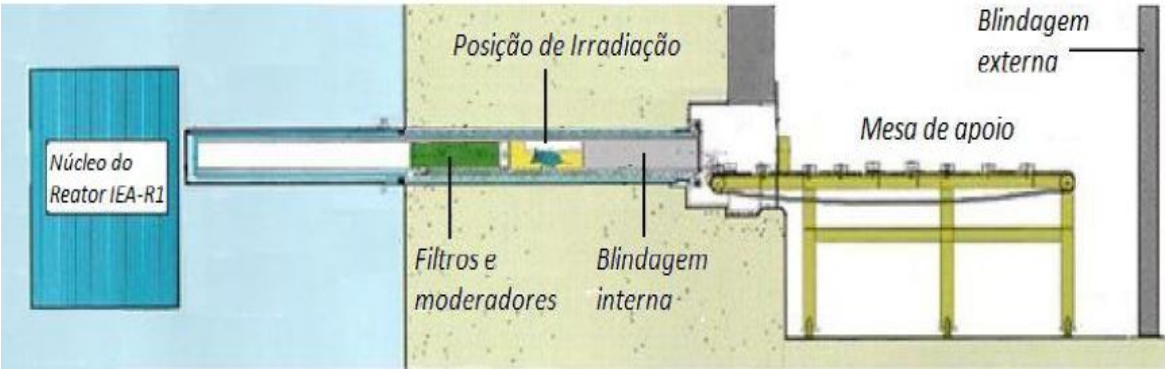

Figura 14. Esquema simplificado da instalação para pesquisa em BNCT no reator IEA-R1 [18].

A instalação conta com um mecanismo de trilhos para posicionamento da amostra a ser irradiada. O mecanismo para posicionamento da amostra retira e insere automaticamente a blindagem interna, ao abrir ou fechar o canal de irradiação, não necessitando que o reator esteja desligado para inserir o material a ser irradiado.

As amostras são posicionadas sobre um suporte que insere a amostra até a posição de irradiação Figura 15.

Figura 15. Suporte para colocar amostras na cesta de irradiação.

A condição atual da instalação junto ao Reator ainda possui algumas características que limitam o desenvolvimento das pesquisas. O feixe obtido nessa instalação possui alem dos nêutrons térmicos alguns contaminantes, como nêutrons em outras faixas de energia (epitérmicos, rápidos) e radiação gama.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Irradiador de campo misto gama e nêutron

No irradiador 02 não é possível obter um campo misto com diferentes espectros energéticos de nêutrons. Essa característica não viabiliza verificar como a resposta TL dos diferentes tipos de TLDs é influenciada pela variação do espectro energético do campo, ou do fluxo relativo gama/nêutrons térmicos.

Para um melhor entendimento da influência da variação do espectro energético, e do valor do fluxo relativo na resposta dos TLDs, foi projetado com o auxílio do MCNP5 um irradiador que permitiu obter um campo misto com diferentes espectros de nêutrons e diferentes intensidades de fluxo de nêutrons e radiação gama. O irradiador projetado constitui o terceiro modelo feito pelo grupo de pesquisa em BNCT/IPEN, por isso foi nomeado de Irradiador 03.

Trabalhando com a ideia de usar material para moderar os nêutrons rápidos emitidos pela fonte de ^{241}AmBe e com material para refletir os nêutrons térmicos nas posições mais afastadas da fonte, foi calculado com o MCNP 5 alguns perfis de fluxo até se chegar em um modelo com diferentes relações entre o fluxo de nêutrons térmicos e radiação gama.

O perfil do fluxo esperado foi calculado com o MCNP 5, tendo em vista sua viabilidade de construção, Figura 16.

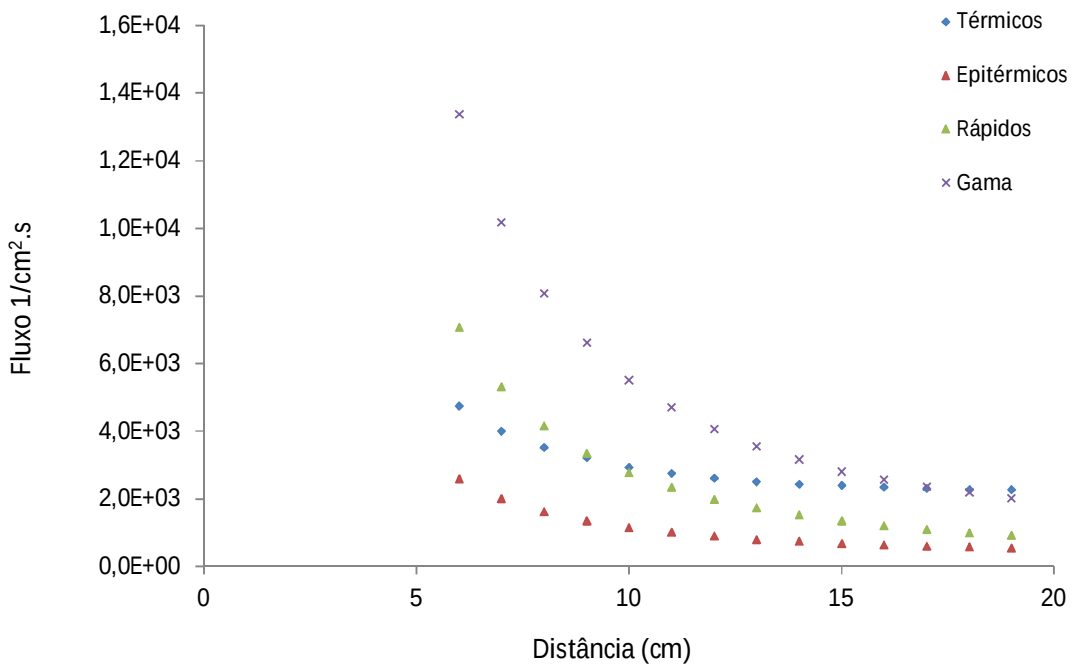

Figura 16. Estimativa da variação do fluxo de nêutrons (térmicos, epitérmicos e rápidos) e do raio gama ao longo do raio do irradiador. Valores calculados com MCNP5.

A análise feita com o MCNP 5 apresentando o perfil do fluxo mostra que o fluxo de gama e de nêutrons rápidos caem mais rapidamente em relação ao feixe térmico. O fluxo de nêutrons epitérmicos apresenta o menor valor em relação aos nêutrons térmicos, rápidos e raio gama. O fluxo de nêutrons térmicos sofre uma redução média de 50 % a partir de 13 cm.

As características do projeto atendem as expectativas pretendidas em relação ao fluxo relativo gama e nêutron e em relação o espectro energético dos nêutrons. A Figura 17 apresenta a variação percentual dos nêutrons térmicos, epitérmicos e rápidos ao longo do irradiador nas possíveis posições de irradiações.

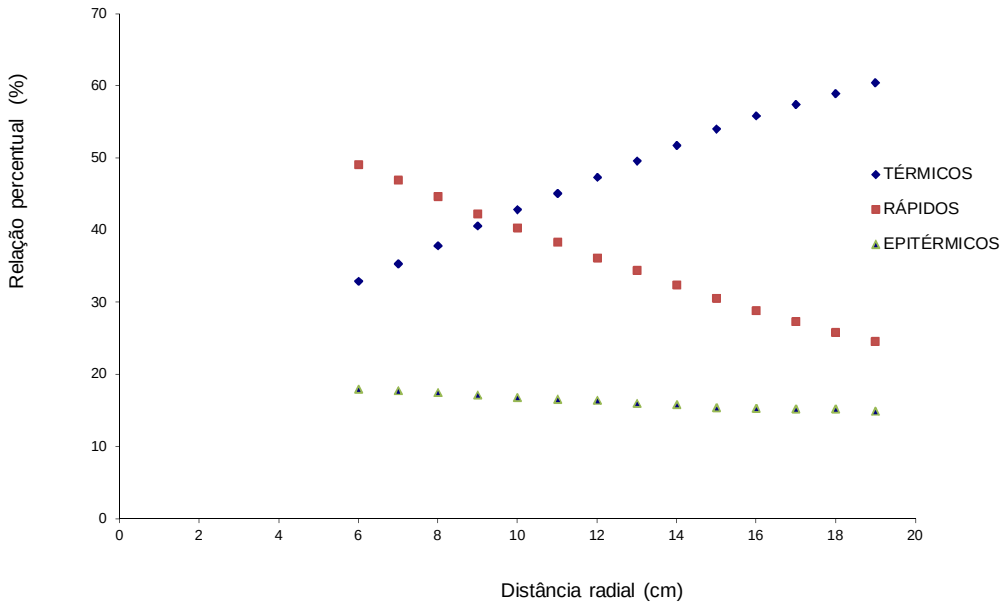

Figura 17. Variação do fluxo relativo de nêutrons por faixa de energia (Valores calculados com o MCNP5).

As características do perfil energético calculadas para o irradiador apresentam-se adequadas para o estudo da influência do fluxo relativo gama e nêutron na resposta dos diferentes tipos de TLDs. O projeto de construção do irradiador envolveu diversas simulações no MCNP 5, verificando como a geometria e os diferentes tipos de materiais influenciam o perfil do campo misto obtido com a fonte de ^{241}AmBe, cujo espectro é conhecido.

A Figura 18 apresenta as dimensões do projeto do Irradiador 03, cujas características permitiram a obtenção do perfil de fluxo apresentado na Figura 16 e Figura 17.

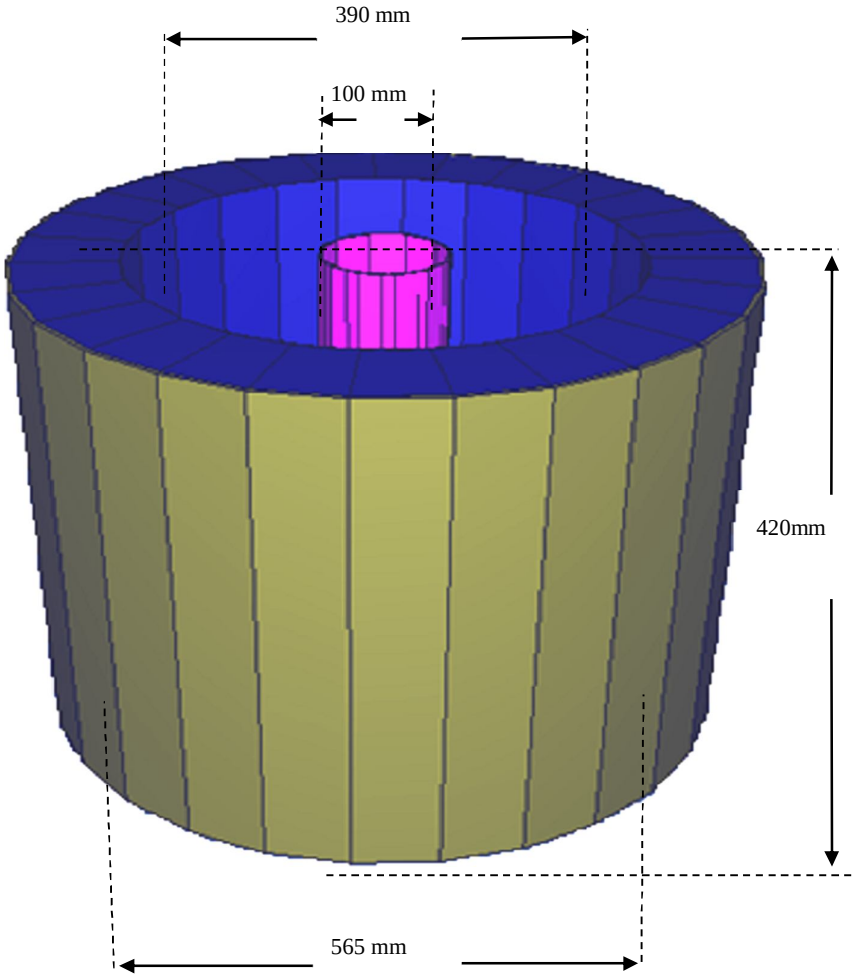

Figura 18. Desenho esquemático com as dimensões do Irradiador 03 (obtido no programa Vised)

O cilindro na parte central do irradiador e a parte mais exterior do irradiador foram preenchidos com água. A região mais interna visa a moderação dos nêutrons rápidos emitidos pela fonte de ^{241}AmBe e a parte mais externa a reflexão dos nêutrons térmicos, aumentando o fluxo de nêutrons térmicos na posição de irradiação.

Para posicionar os TLDs ao longo do irradiador foram utilizados suportes de acrílicos, cada suporte continha nove TLDs sendo três TLDs de cada tipo, distribuídos numa matriz 3x3. Os três TLDs da primeira linha superior são TLDs 100, da segunda linha TLDs 400, e da terceira linha TLDs 700.

Foi verificado com o MCNP 5 o perfil da distribuição vertical do fluxo nas posições de irradiação onde se encontra os suportes. O resultado obtido é apresentado na Figura 19.

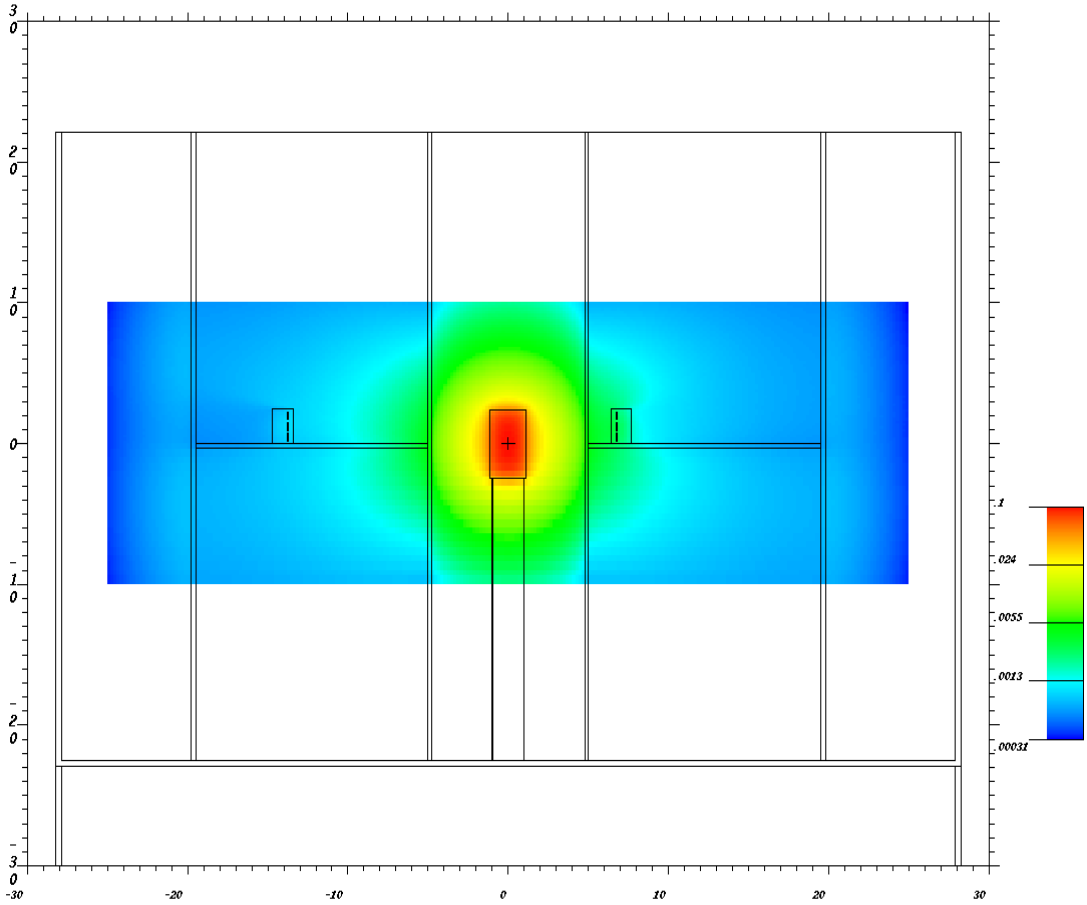

Figura 19. Representação do MCNP para o mapeamento vertical do fluxo de nêutrons do irradiador 03 com a presença dos suportes de TLDs.

Numa primeira análise o fluxo na parte inferior dos suportes é similar ao na parte superior nas posições de irradiação próximas à altura média da fonte.

Embora os suportes fossem posicionados diante de um mesmo fluxo, considerando a distribuição no plano vertical, as condições no interior do suporte são levemente modificadas pelo conjunto suporte mais dosímetros, devido a termalização que ocorre no material do suporte nos próprios TLDs.

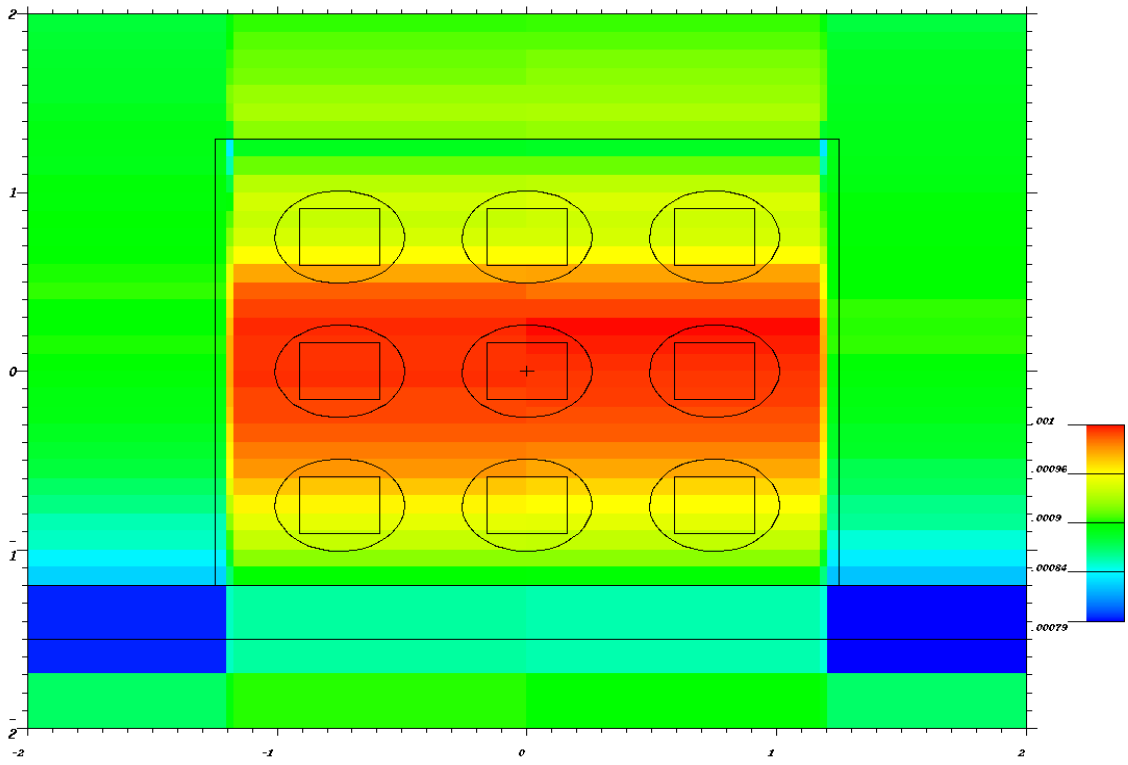

Figura 20. Resultado do MCNP para o mapeamento do fluxo de nêutrons no plano em que se encontram os TLDs no interior do suporte.

Para os resultados apresentados na Figura 20, o fluxo de nêutrons térmicos é 4% maior na posição central do suporte, ou seja, na linha 2 considerando as posições dos TLDs como uma matriz 3x3.

Embora o fluxo na posição central no interior dos suportes seja maior, essa diferença no fluxo é menor do que a precisão obtida com TLDs, que é próximo a 5%.

Como os TLDs de LiF estão nas posições extremas do suporte, e os TLDs 400 na posição central, pode-se afirmar que o TLD-100 e TLD-700 estão sob um fluxo de mesma intensidade, e os resultados podem ser analisados como obtidos em condições similares, não necessitando aplicar um fator de correção em relação a posição de irradiação dos TLDs.

Visto os suportes causarem uma perturbação no fluxo de nêutrons, o posicionamento destes precisou ser analisado para estabelecer posições que interferissem minimamente no fluxo incidente nos suportes adjacentes.

A Figura 21 apresenta a variação horizontal do fluxo de nêutrons ao longo do raio do irradiador, e a perturbação no fluxo causada pelos suportes de acrílico, calculados a partir do MCNP5.

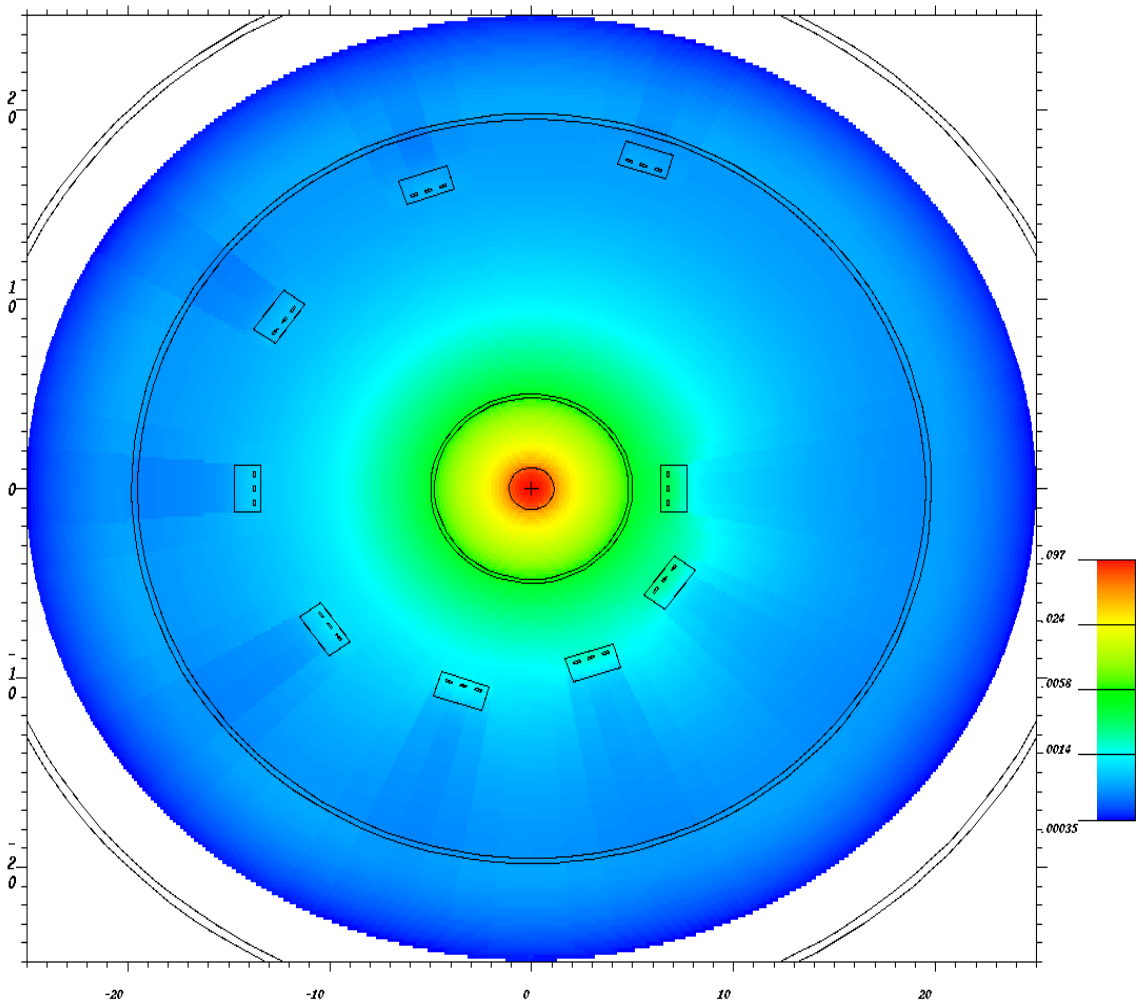

Figura 21. Mapeamento horizontal do fluxo de nêutrons no irradiador 03, com a presença dos suportes de TLDs.

Os resultados apresentados, na Figura 21 mostram que para as posições escolhidas, a perturbação causada por um suporte não interfere no fluxo incidente em suportes vizinhos. Portanto as posições dos suportes foram assim definidas: O primeiro suporte ficou 5,4 cm da fonte e os oitos seguintes a cada intervalo de 1,4 cm, o ângulo entre cada suporte é aproximadamente 36°.

Portanto, a partir do projeto elaborado no MCNP 5, o Irradiador 03 foi construído utilizando dois tambores de polietileno com altura de 420 mm, e diâmetros de 390 mm e 565 mm. Foram também utilizados 400 mm de tubo de PVC com diâmetro de 101,6 mm e 200 mm de tubo de PVC com diâmetro de 19,05 mm, Figura 22.

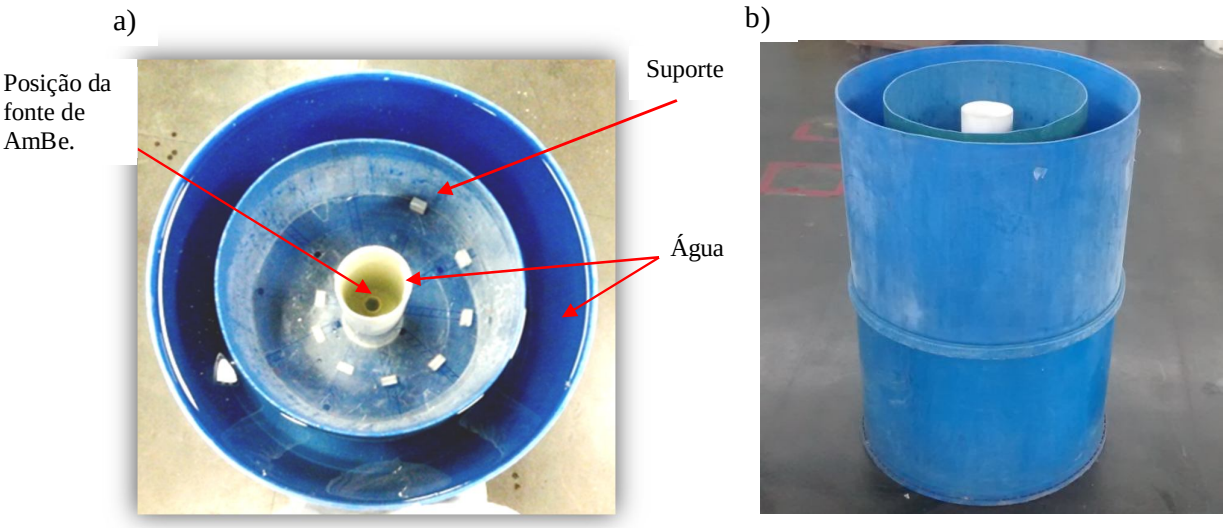

Figura 22. Fotos do irradiador 03. a) Vista superior com os 9 suportes de TLDs posicionados. b) Vista externa do irradiador

Um seguimento de 200 mm de tubo de PVC foi fixado no centro do irradiador como suporte de apoio a fonte, mantendo-a na altura média do tanque. Metade do tambor foi usado como suporte do irradiador para mantê-lo afastado do chão reduzindo o a influência do espalhamento no solo.

A fonte de ^{241}AmBe de 2Ci foi posicionada no centro do sistema durante as irradiações e os suportes com TLDs distribuídos nas diferentes distâncias radiais sobre um suporte acrílico na altura média da fonte.

A parte mais interior do irradiador onde a fonte foi posicionada, e a parte mais externa do irradiador foram preenchidas com água. Como a fonte de ^{241}AmBe é um emissor gama e basicamente de nêutrons rápidos, a água próxima a fonte teve a função de contribuir no aumento relativo do fluxo de nêutrons térmicos a partir da termalização dos nêutrons emitidos pela fonte. A água na parte mais exterior funcionou como refletor de nêutrons térmicos.

Foram feitas duas irradiações testes de 24hs, para verificar o funcionamento do irradiador e a intensidade das respostas luminescentes em três posições, uma posição

mais próxima (5 cm), outra intermediária (13 cm), e outra na posição mais afastada da fonte (19 cm).

As Figura 23, Figura 24 e Figura 25 apresentam os resultados obtidos em duas irradiações.

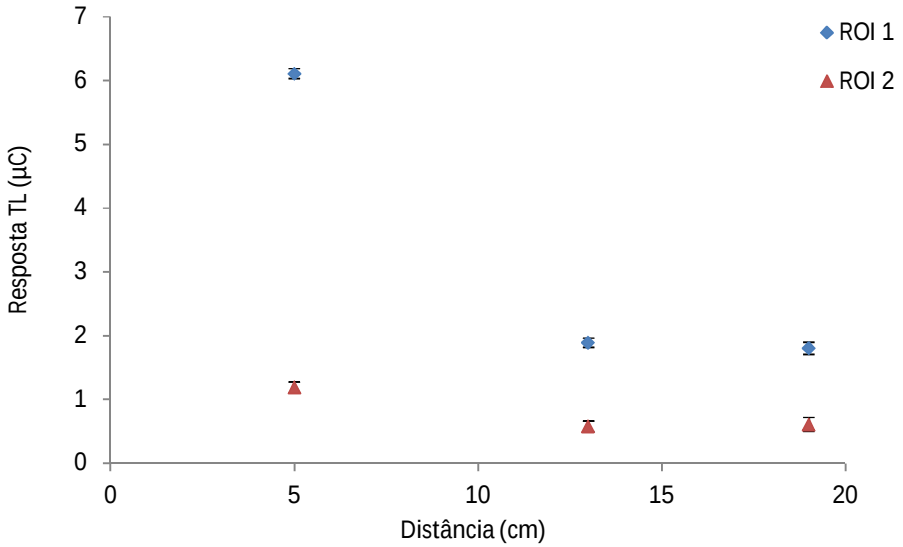

Figura 23. Resposta TL média obtida com o 9 TLDs-100 no irradiador 03 em três posições distintas.

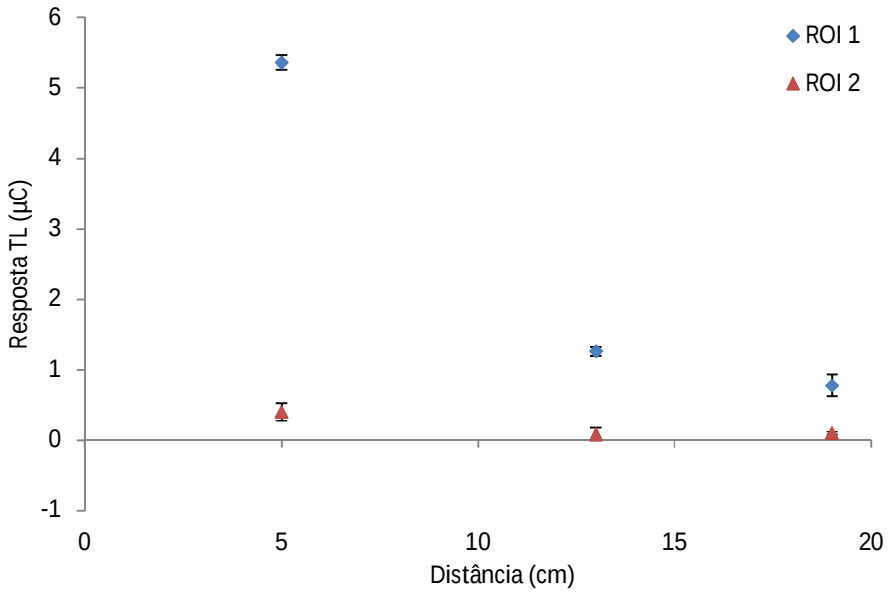

Figura 24. Resposta TL média obtida com o 9 TLDs-700 no irradiador 03 em três posições distintas.

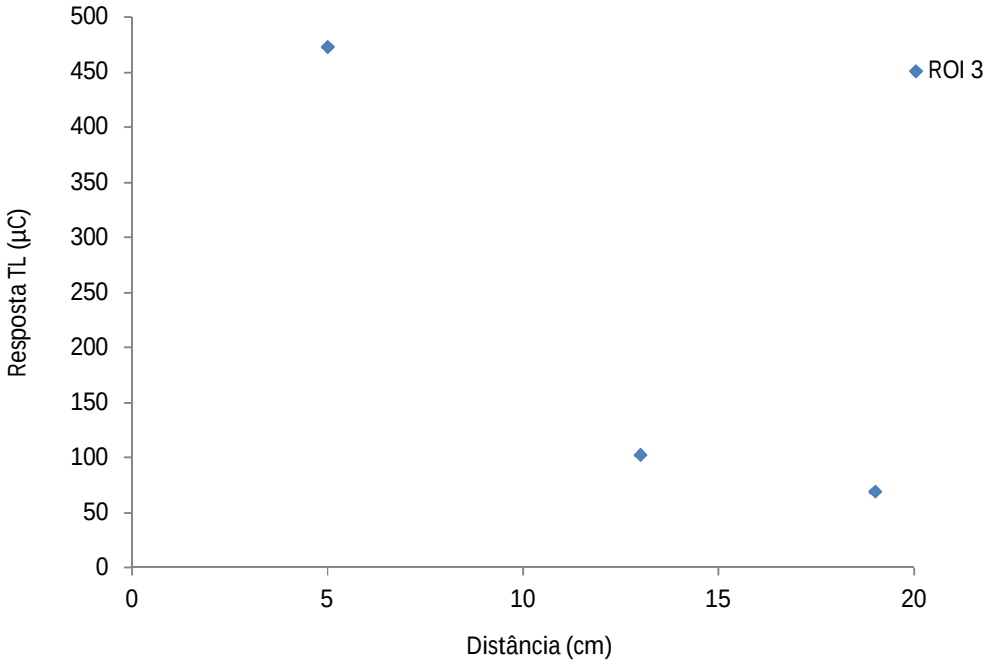

Figura 25. Resposta TL média obtida com o 9 TLDs-400 no irradiador 03 em três posições distintas.

As respostas obtidas com o TLDs-100 para a posição mais afastada mostram que o TLD-100 teve uma menor redução na sua resposta TL, em comparação com a resposta dos TLDs 700 para as mesmas posições. Esse fato pode ser explicado pela maior sensibilidade do TLD-100 aos nêutrons térmicos que são refletidos nas paredes no irradiador. Esse comportamento sinaliza que o perfil do fluxo obtido no irradiador tem as características projetadas, ou seja, o fluxo de nêutrons térmicos na parte posterior é maior que o fluxo de radiação gama, Figura 16.

O sinal TL obtido nas duas irradiações com os três tipos de TLDs nas três posições irradiadas, têm intensidade que permite o estudo da resposta TL em campos mistos com diferentes espectros energéticos.

5.2 Estudo da reprodutibilidade da resposta em campo gama puro.

Das respostas dos TLDs, pode-se verificar que para uma mesma irradiação, esses têm respostas significativamente diferentes entre si.

A Figura 26 apresenta a resposta individual de cada um dos 30 TLDs 100 para uma única irradiação a 20mGy no ^{60}Co.

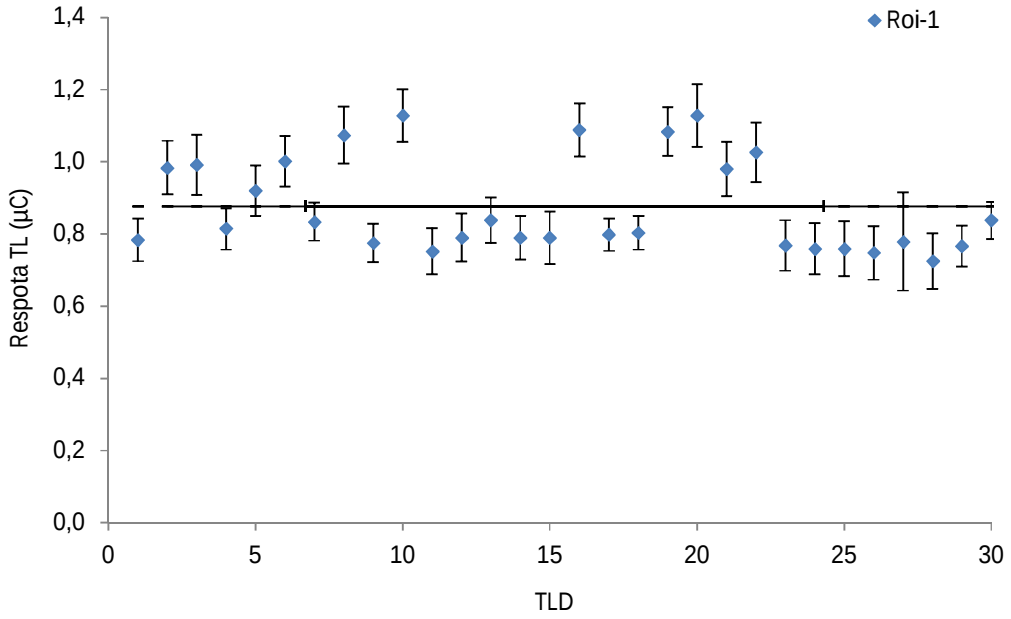

Figura 26. Resposta TL individual dos trintas TLDs-100 para uma dose de 20 mGy no ^{60}Co, apresentados com a incerteza da média.

A dispersão observada indica que um TLD do mesmo tipo, apresenta eficiência de resposta TL diferentes. A eficiência individual de um TLD fica evidente na comparação de sua resposta individual ao longo de outras irradiações, como observado na Figura 27.

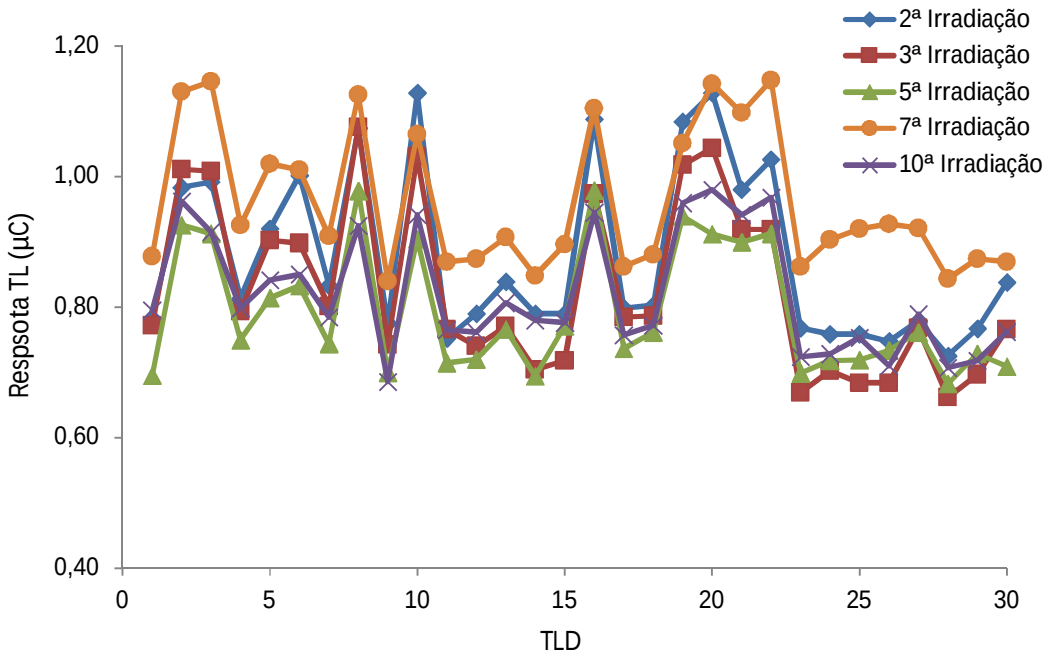

Figura 27. Comparação de respostas individuais do TLD-100 em diferentes irradiações com dose de 20 mGy no ^{60}Co.

Comparando-se as respostas dos TLDs ao longo das irradiações, observa-se que, se a resposta individual de um TLD aumenta ou diminui em relação à outra irradiação, o mesmo se observa nos demais TLDs. Essa diferença está associada às dificuldades na reprodutibilidade dos dados, ou seja, são incertezas associadas aos processos de irradiação, tratamento e leitura. Os resultados e discussões apresentados, analisando a eficiência individual do TLD-100, exemplifica o que também ocorre com os outros dois tipos de TLDs usados neste trabalho, (TLD-400 e TLD-700).

As Figura 28, Figura 29 e Figura 30 apresentam respectivamente as respostas médias de 30 TLDs 100, 30 TLDs 700 e 30 TLDs 400, submetidos a dez irradiações no campo gama puro, usando a fonte de ^{60}Co.

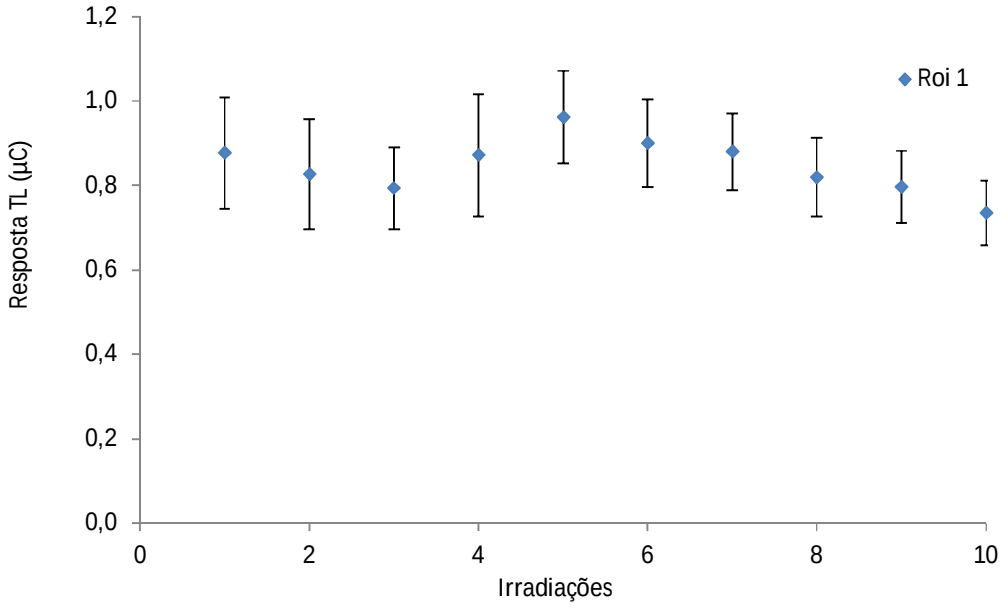

Figura 28. Resposta TL média de 30 TLDs-100 para dose de 20mGy no ^{60}Co em 10 irradiações diferentes.

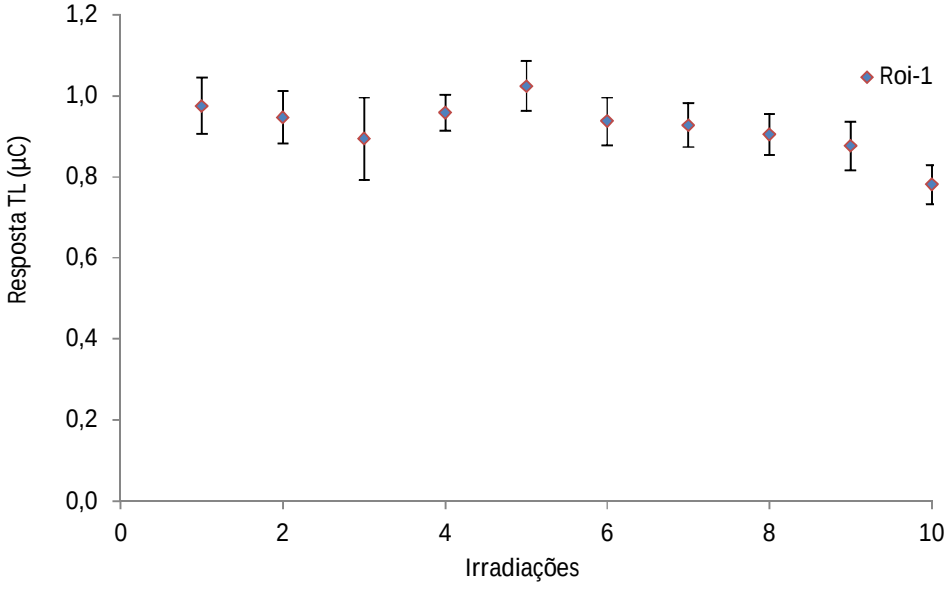

Figura 29. Resposta TL média de 30 TLDs-700 para dose de 20mGy no ^{60}Co em 10 irradiações diferentes.

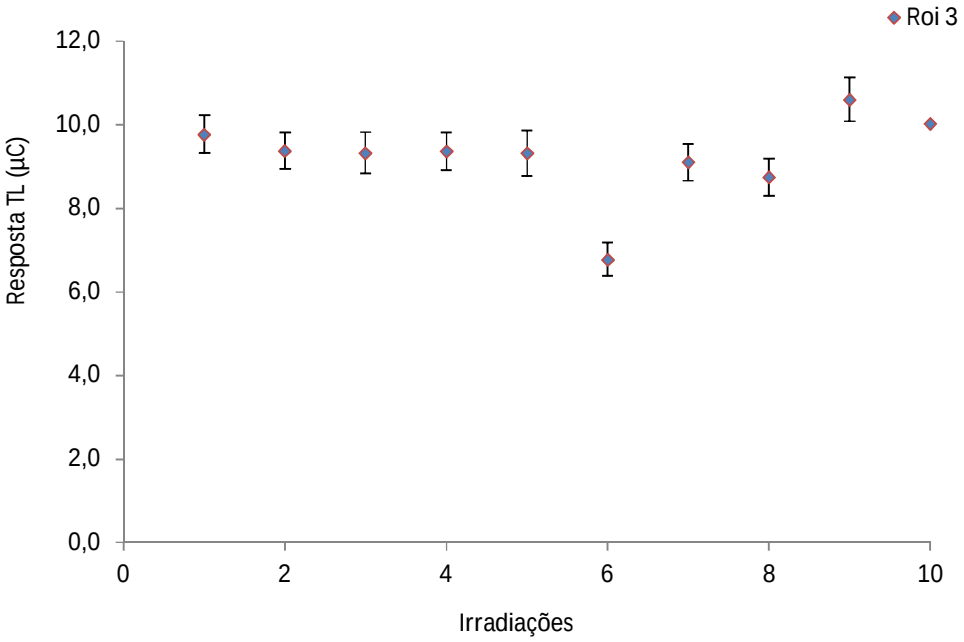

Figura 30. Resposta TL média de 30 TLDs-400 para dose de 20mGy no ^{60}Co em 10 irradiações diferentes.

A resposta individual de cada TLD (TLD-100) em uma irradiação apresentou um desvio padrão médio de 0,13 µC, sendo este desvio maior que o obtido na média das respostas do grupo, que apresentou um desvio padrão de 0,065 µC. No TLD-700 e TLD-400 também se observa que a dispersão na média da resposta individual de cada TLD em uma dada irradiação, é maior que a dispersão nas médias das respostas do grupo.

Levando em consideração as diferenças na eficiência individual dos TLDs, foi criado um fator de correção de eficiência individual para um melhor ajuste dos dados em torno da resposta média, melhorando a estimativa das medidas. Comparada à resposta individual de cada TLD em relação à resposta média de um grupo de TLDs, é possível verificar que dado TLD apresenta um desvio sistemático em relação à média. O valor médio nesse desvio gera um fator que pode ser usado para correção das respostas, obtendo-se uma melhor estimativa na medida. Este fator foi nomeado como Fator de Correção, e sua definição e nomenclatura seguem como já utilizadas em trabalhos feitos pelo grupo de BNCT-IPEN/CEN [4].

$$FN_{i,n} = \frac{M_n}{R_{i,n}}$$

$$M_n = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} R_{i,n}$$

Onde:

- *i* é o índice associado ao TLD;
- *n* é o índice associado à irradiação;
- $R_{i,n}$ é a resposta do TLD *i* na irradiação *n*;
- M_n é a média das respostas dos TLDs na irradiação *n*;
- $FN_{i,n}$ é o Fator de Correção do TLD *i* na irradiação *n*.

A média dos fatores de normalização do TLD em cada irradiação gera o fator de correção do TLD, FN_i. A incerteza dos fatores de correção foi obtida pelo desvio padrão, σ_{FN_i}.

$$FN_i = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} FN_{i,n}$$

$$\sigma_{FN_i} = \sqrt{\frac{\left(FN_i - \overline{FN_i}\right)^2}{N-1}}$$

Ao multiplicar a resposta individual de cada TLD por seu fator de correção FN_i, temos sua resposta corrigida pela eficiência individual. As equações a seguir apresentam como obter a resposta corrigida, RN_i, de dado TLD e sua incerteza, σ_{RCi}.

$$RN_i = R_i \times FN_i$$

$$\sigma_{RN_i} = RN_i \times \sigma_{FN_i}$$

Para ilustrar o ajuste conseguido aplicando o fator de correção nas respostas, a Figura 31 apresenta as respostas médias de 30 TLDs 100 para uma irradiação no ^{60}Co, sem a aplicação do fator de correção. A Figura 32 apresenta os dados para a mesma irradiação aplicando o fator de correção.

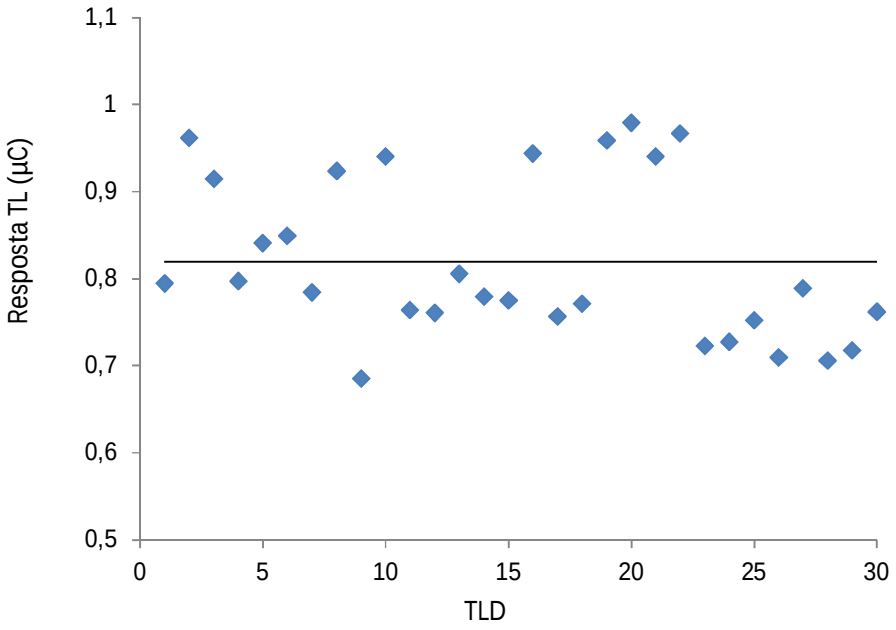

Figura 31. Resposta TL individual de trinta TLDs-100 para uma única irradiação de 20mGy no ^{60}Co. Dados apresentados sem aplicação do fator de correção de eficiência individual.

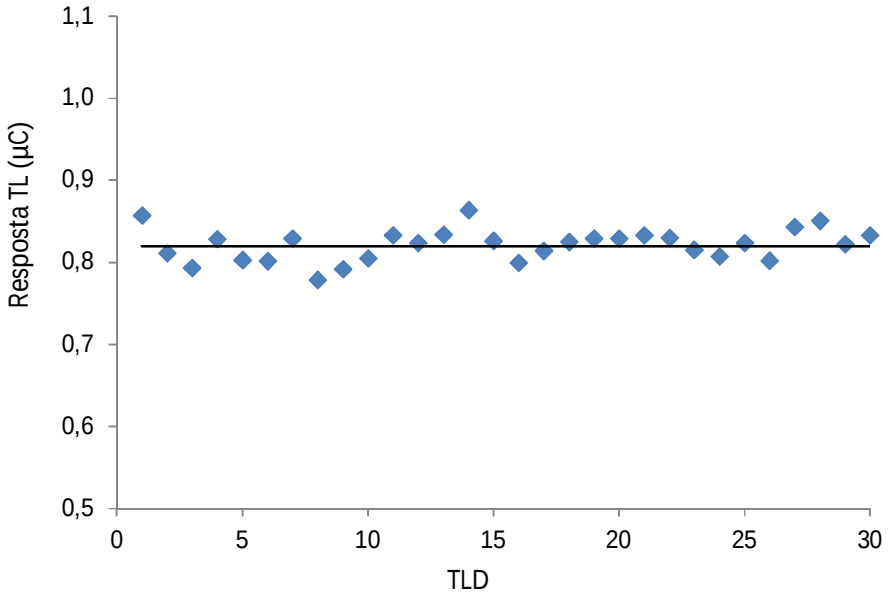

Figura 32. Resposta TL individual de trinta TLDs-100 para uma única irradiação de 20mGy no ^{60}Co. Dados apresentados com aplicação do fator de correção de eficiência individual.

No estudo da reprodutibilidade em campos gama foi verificado pelo menos duas fontes na incerteza das medidas. Sendo a primeira associada à eficiência individual de cada TLD e a segunda está relacionada aos ciclos de tratamento, irradiação e leitura.

Com o fator de correção foi possível conseguir um melhor ajuste dos dados corrigindo as incertezas associadas à eficiência individual de cada TLD. Por exemplo, os dados obtidos para o TLD-100, apresentados na Figura 31e Figura 32, tiveram seu desvio padrão relativo reduzido de 11,37% para 2,38%, aplicando o fator de normalização. A metodologia para obtenção dos valores do fator de normalização e seus respectivos valores estão apresentados no Anexo A. Referente às incertezas relativas aos ciclos de irradiação foram adotados alguns procedimentos, apresentados na seção 4.5, além de cuidados com a exposição à luz e grandes variações térmicas, discutidos no Anexo B.

5.3 Estudo da Reprodutibilidade da resposta em campo misto gama e nêutron

Os TLDs foram irradiados quatro vezes no campo misto obtido no sistema descrito na seção 4.7.2. A Figura 33 apresenta a dispersão observada nas duas regiões de interesse para uma irradiação com 27 TLDs (TLD-100).

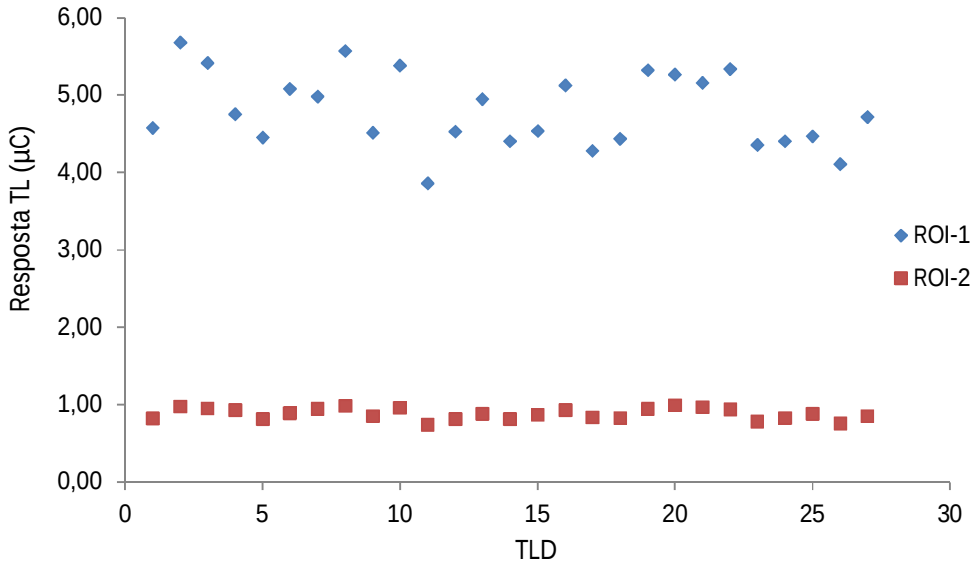

Figura 33. Respostas individuais de 27 TLDs-100 em uma irradiação de 24hs no irradiador 02 (Sem aplicação do fator de normalização).

A redução no número de TLDs, irradiados no campo misto, se deu por conta de melhor acomodá-los nos suportes de isopor, que na ocasião só foi possível acomodar 27 por conta de pequenos danos no suporte.

As respostas dos TLDs em campo misto apresentaram comportamento similar ao observado no estudo da reprodutibilidade em campo gama puro, onde foi observado que os TLDs têm sensibilidade diferente para mesma irradiação.

A Figura 34, Figura 35 e Figura 36 apresentam respectivamente as médias de respostas dos TLDs 100, TLDs 700 e TLDs 400, para quatro irradiações de 24hs no irradiador 02.

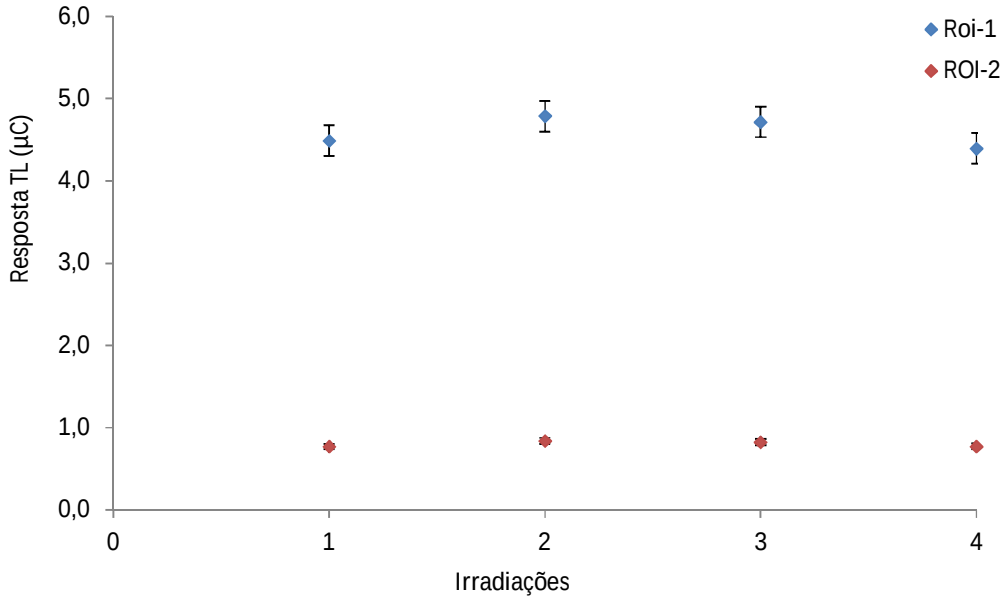

Figura 34. Resposta média de 27 TLDs 100 em 4 irradiações de 24hs no irradiador 02.

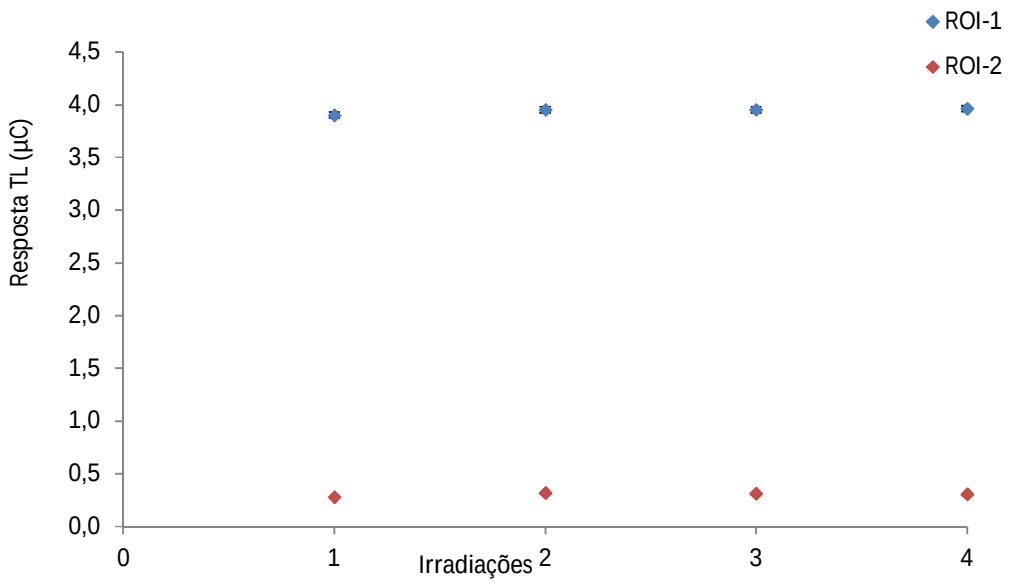

Figura 35. Resposta média de 27 TLDs 700 em 4 irradiações de 24hs no irradiador 02.

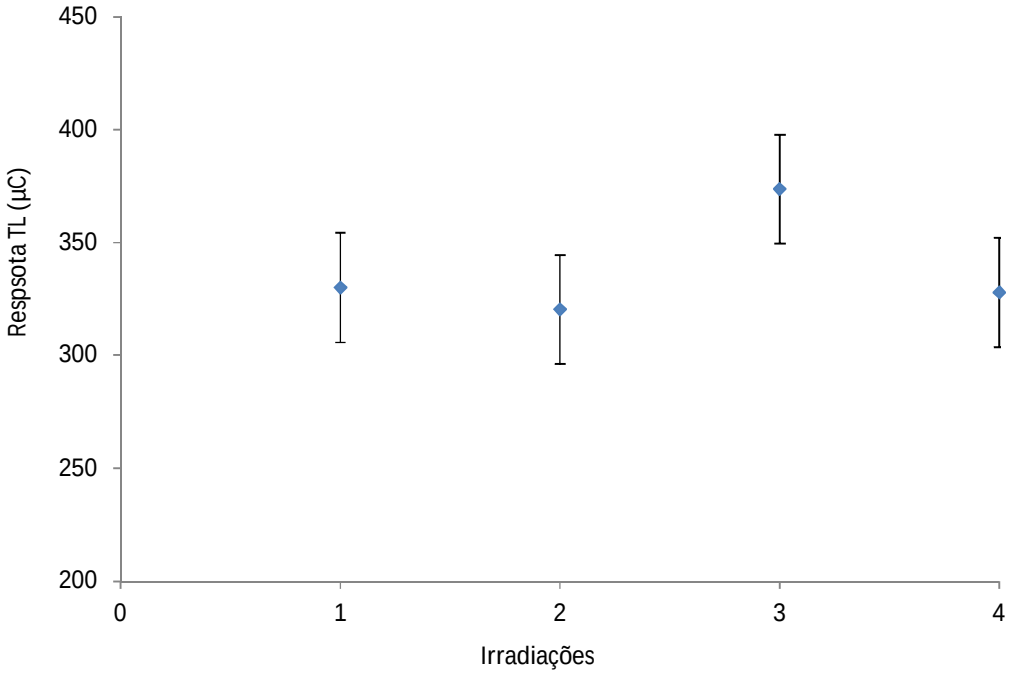

Figura 36. Resposta média de 27 TLDs-400 em 4 irradiações de 24hs no irradiador 02.

Os apresentaram valores próximos na resposta TL, Figura 28 e Figura 29. Na comparação dos TLDs-100 e TLDs-700 para irradiação no campo misto gama e

nêutron foi verificado que o TLD-100 apresentou para primeira região de interesse (ROI-1), uma resposta média 14% maior em comparação a resposta obtida com o TLD-700.

Uma análise com o MCNP comparando os valores do Kerma no ar obtidos no irradiador 01 e 02, permitiram verificar a contribuição dos nêutrons no aumento da resposta TL. A Tabela-5apresenta o valor do Kerma para os dois sistemas.

Tabela 5. Valores do kerma no ar para o campo gama puro (^{60}Co) e para o campo misto gama e nêutron (AmBe).

	^{60}Co	**AmBe**
	kerma no ar	kerma no ar
[mGy]		
Fótons	20	80,3 (1,4)
Nêutrons	---	35,68 (64)

Dos dados apresentados na Tabela-5 observa-se que o valor do kerma no ar calculado para os fótons aumentou quatro vezes na comparação entre o AmBe e o ^{60}Co. Na comparação da resposta dos TLDs de LiF entre os dois sistemas foi verificado que o TLD-700 similarmente teve um aumento de aproximadamente quatro vezes na sua resposta TL, conforme Tabela-6.

Tabela 6. Comparação da resposta TL média dos TLDs de LiF para irradiações feitas no ^{60}Co e no AmBe.

[uC]	**TLD 100**		**TLD 700**	
	ROI 1	ROI 2	ROI 1	ROI 2
^{60}Co	0,85 (0,06)	0,05 (1)	0,92(0,06)	0,01 (2)
AmBe	4,60 (0,18)	0,80 (0,04)	3,94(0,03)	0,31(0,02)

Em comparação ao campo gama puro, a resposta TL do TLD-100 para o campo misto teve um aumento de cinco vezes, ao passo que a resposta TL do TLD-700 teve um aumento de quatro vezes. Essa diferença no aumento da resposta dos TLDs de LiF, pode ser associada a maior sensibilidade do TLD-100 aos nêutrons térmicos, devido sua maior concentração de ^{6}Li. Portanto ao se irradiar o TLD-100 e o TLD-700 em um campo misto a diferença de resposta entre os dois está relacionada a contribuição dos

nêutrons na deposição da dose. Essa característica é que permite o uso de TLDs em dosimetria de campo misto gama e nêutron. Considerando a sensibilidade do TLD-700 aos nêutrons quase que nula.

O TLD-400 apresentou um aumento na sua resposta TL de 34 vezes em comparação a irradiação em campo gama puro, aumento este muito maior em comparação aos TLDs de LiF. Os TLDs de CaF2 (TLD-400) apresentam baixa seção de choque para nêutrons em relação ao TLDs de LiF, o que dificulta relacionar esse aumento na resposta, com os nêutrons presente no campo. O fato dos TLDs-400 apresentarem alta dependência energética pode explicar parte dessa diferença. Observado essas características, os TLDs-400 estão sendo usado nesse trabalho apenas como um parâmetro na monitoração da componente gama em campos mistos. Um estudo sobre a influência dos nêutrons na resposta do TLD-400 é apresentado no Anexo C.

5.4 Estudo da Resposta em campo misto com diferentes espectros energéticos.

Os dosímetros foram irradiados três vezes no irradiador 03 para traçar um perfil do campo, e verificar sua relação com o perfil de campo calculado no MCNP5.
Cada suporte continha nove TLDs sendo três TLDs de cada tipo distribuídos numa matriz 3x3. As posições de cada TLD no suporte e a posição do suporte no irradiador foram mantidas, como definidas no projeto do irradiador 03.

Cada ponto experimental apresentado na Figura 37 corresponde à média da resposta obtida por três TLDs em três irradiações distintas de 24 horas. A Figura 37 é referente ao TLD 100, a Figura 38 referente ao TLD 700 e a Figura 39 referente ao TLD 400.

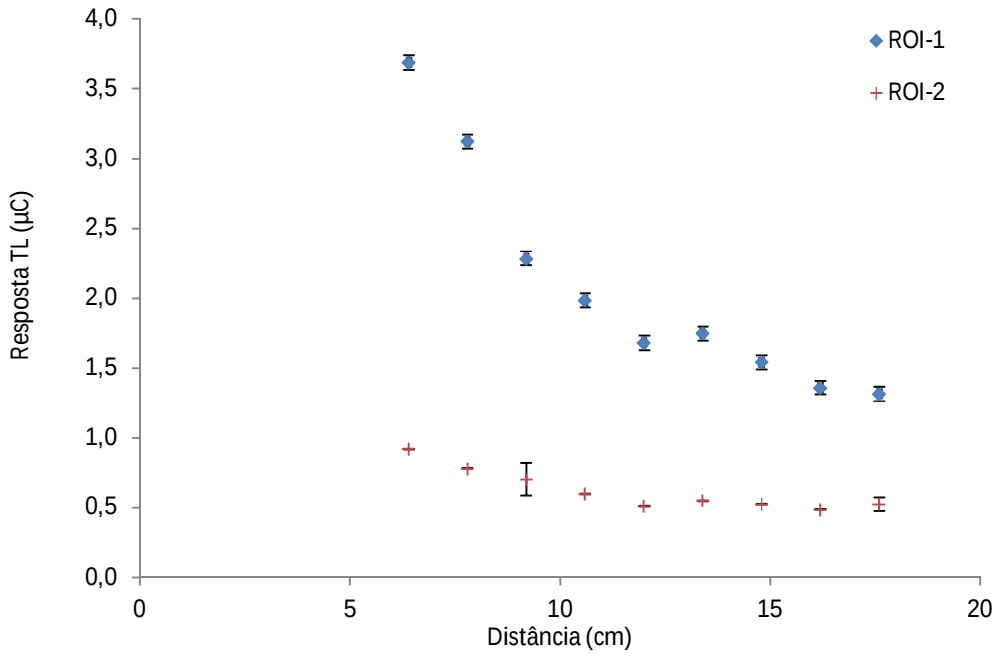

Figura 37. Média de três TLDs-100 em três irradiações no irradiador de campo misto.

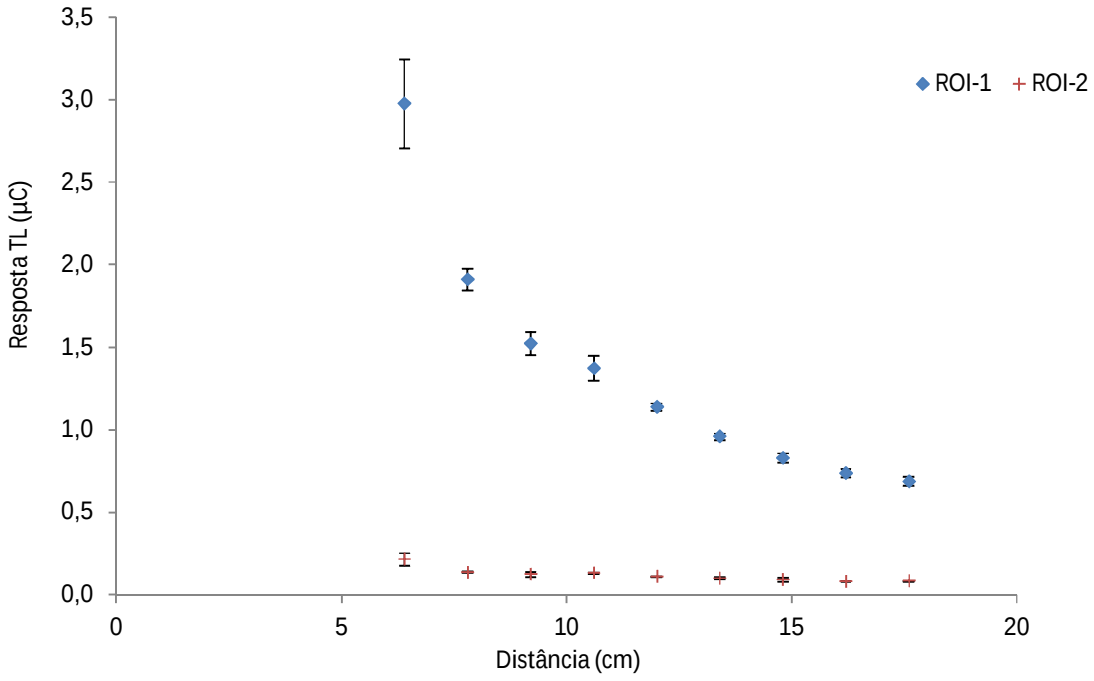

Figura 38. Média de três TLDs-700 em três irradiações no irradiador de campo misto.

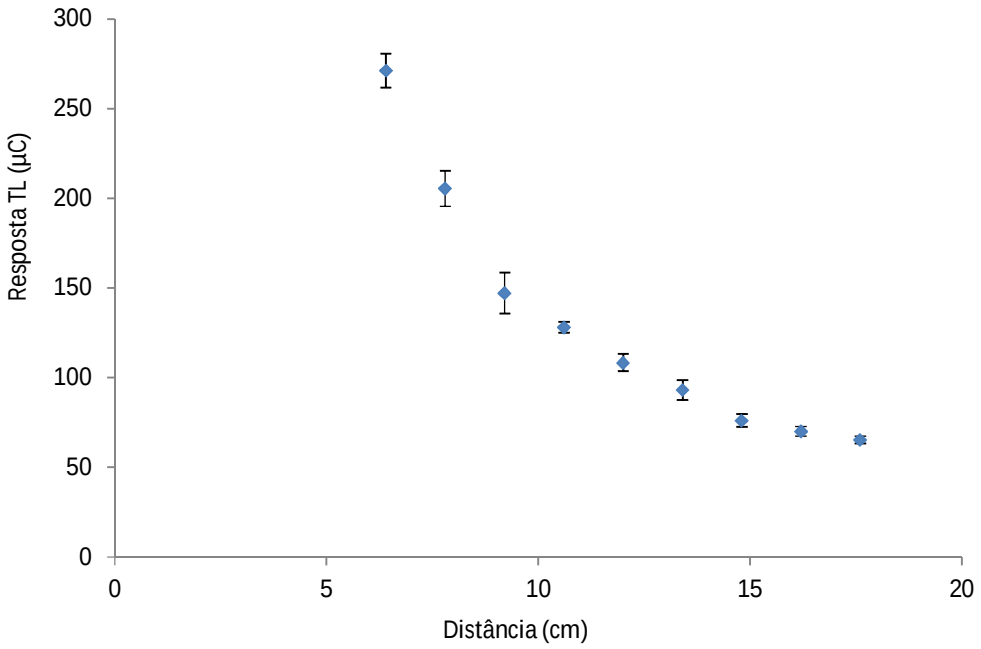

Figura 39. Média de três TLDs-400 em três irradiações no irradiador de campo mistos.

Os resultados obtidos por cálculo com MCNP5 apresentaram uma taxa de redução média de 13 % no fluxo de fótons, e de 5 % no fluxo de nêutrons térmicos. A Tabela 7 apresenta a taxa de redução nas respostas, obtidas experimentalmente para as distancias entre 6,4 cm a 17,6 cm da fonte.

Tabela 7. Taxa de redução média nas respostas dos TLDs.

TLD	ROI-1 (%)	ROI-2 (%)	ROI-3 (%)
100	12,55 ± 0,05	5,52 ± 0,05	-
700	15,18 ± 0,05	9,64 ± 0,05	-
400	-	-	15,98 ± 0,06

A redução observada para a primeira região de interesse (ROI 1) dos TLDs de LiF está próxima à média calculada para o fluxo de fótons. A segunda região de interesse do TLD-100 tem uma taxa de redução na resposta, próximo à observada para a taxa de redução calculada para o fluxo de nêutrons térmicos. A taxa de redução da resposta TL observada no TLD-400 está próximo ao valor calculado para o fluxo de fótons.

5.4.1 Linearidade das Respostas em campos mistos.

Para o estudo da linearidade da resposta no campo misto, os TLDs foram irradiados nas condições descritas na seção 5.4 em outros dois intervalos de tempo, 6 horas e 48 horas.

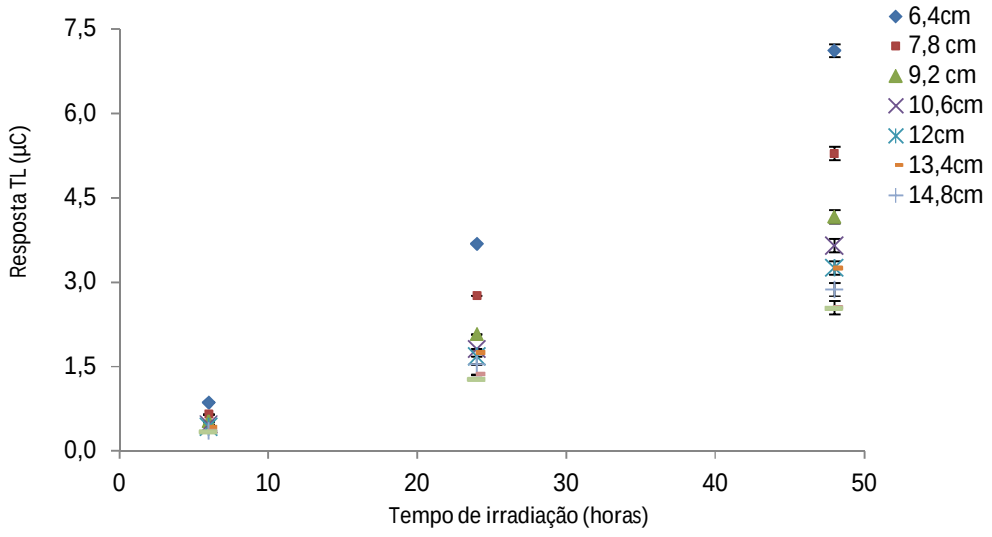

Figura 40. Média da resposta de três TLDs-100 (ROI-1).

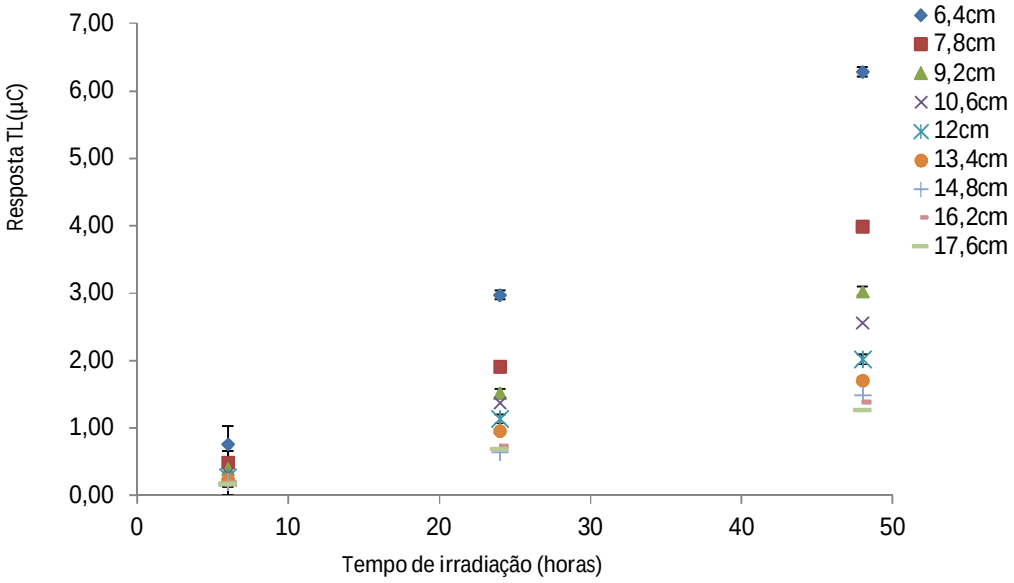

Figura 41. Média da resposta de três TLDs-100 (ROI-2).

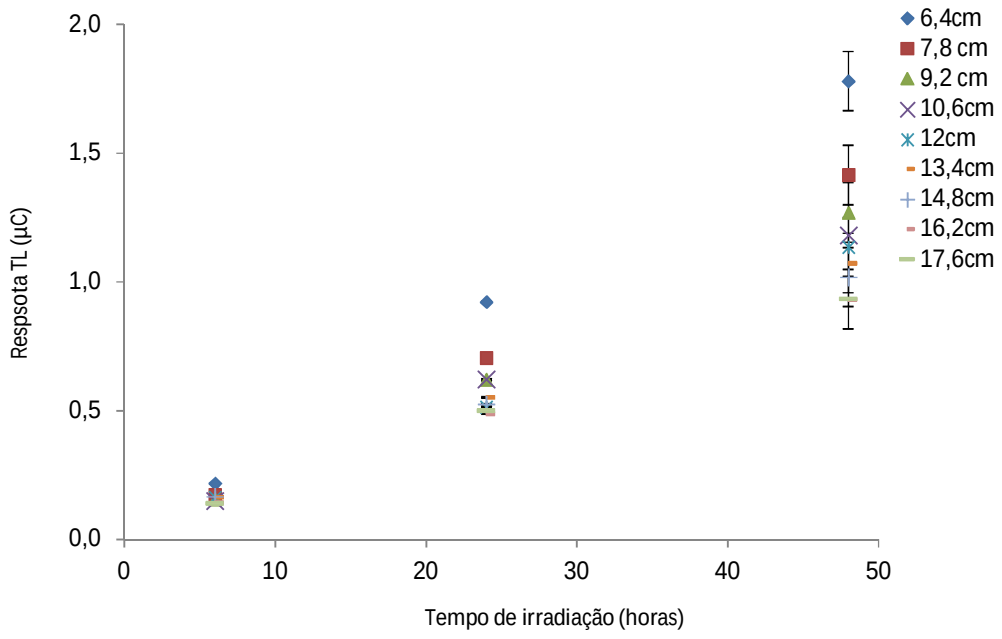

Figura 42. Média da resposta de três TLDs-700 (ROI-1).

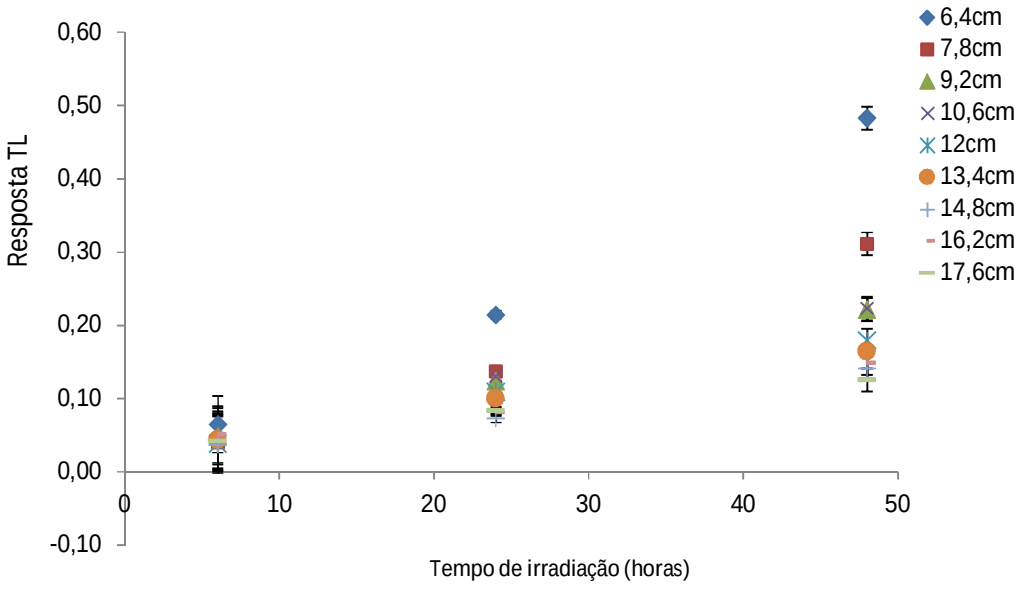

Figura 43. Média da resposta de três TLDs-700 (ROI-2).

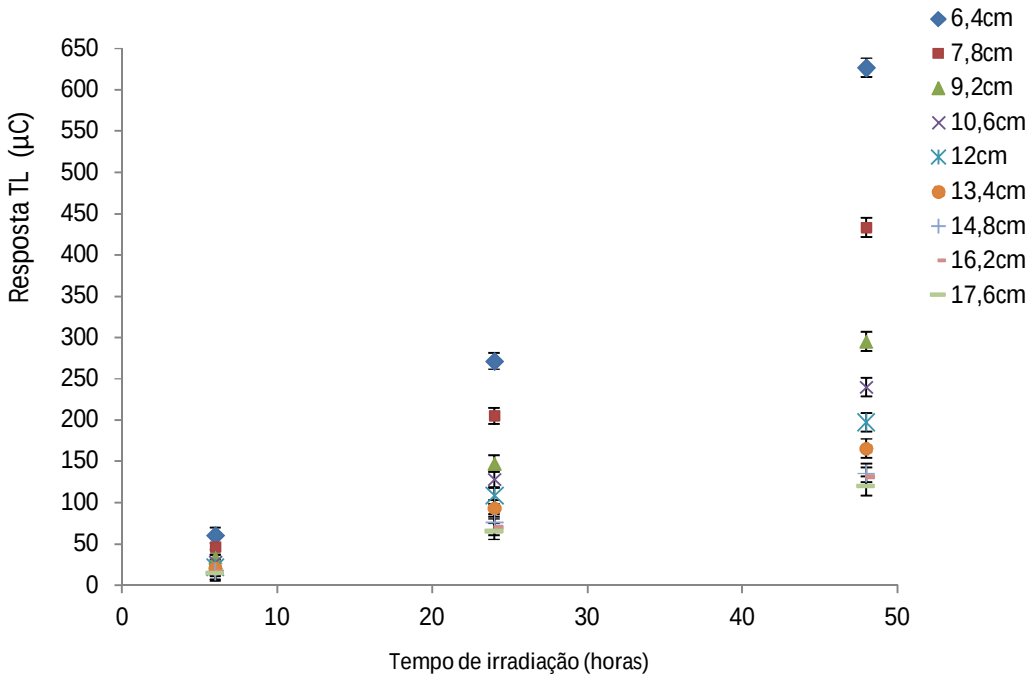

Figura 44. Média da resposta de três TLDs-400.

As duas regiões de interesse dos TLDs de LiF e o TLD-400 apresentaram linearidade nas respostas médias para as doses obtidas.

5.5 Levantamento da curva dose resposta para campos mistos

O entendimento da resposta do TLD em campos mistos depende do levantamento de curvas dose resposta para campos com diferentes espectros de nêutrons e gama. Para o levantamento de tais curvas, foram utilizados os dados obtidos na seção 5.4.1.

Para cada posição foi calculada com o MCNP5, a dose depositada em cada TLD devido a nêutrons e a fótons, e relacionada com o ROI-1, onde temos uma concentração de picos relacionados a raios gama e a nêutrons.

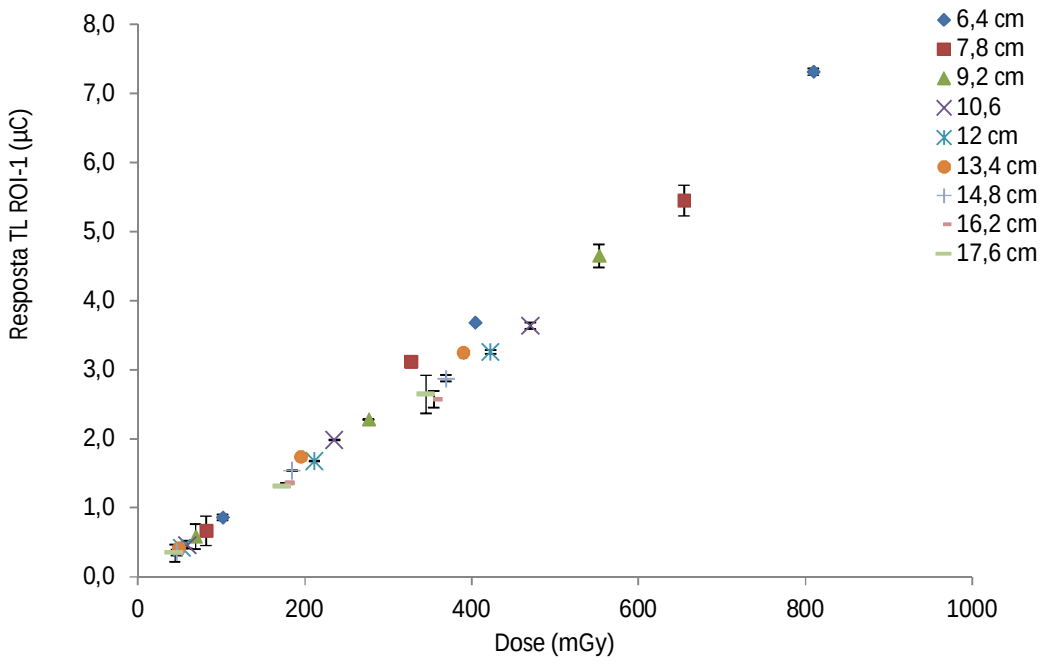

Figura 45. Curvas de Calibração do TLD-100 (ROI-1) para nove distancias.

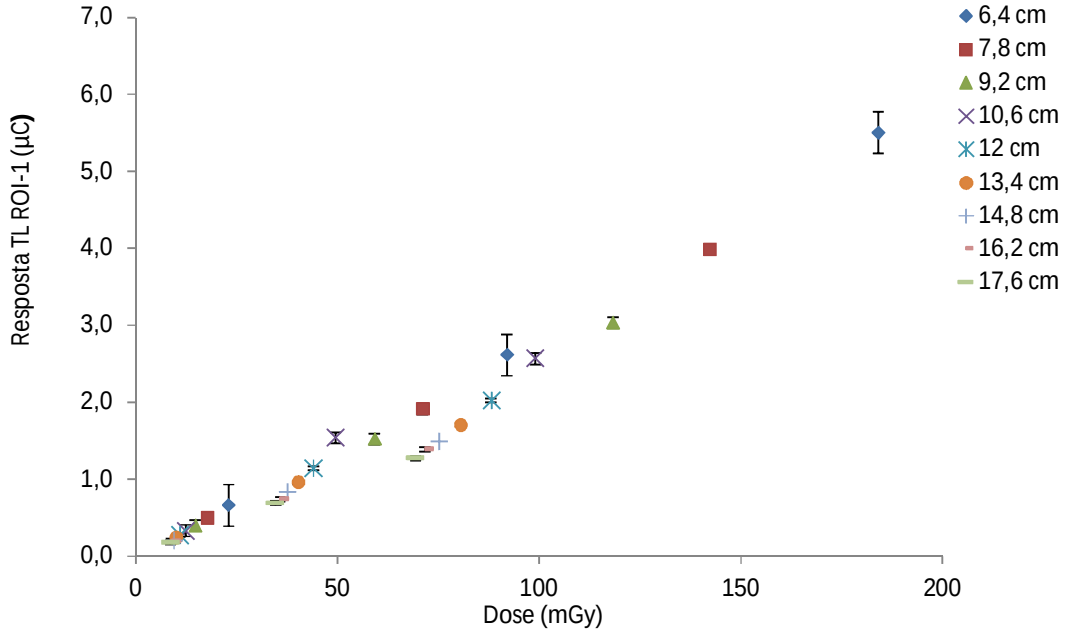

Figura 46. Curvas de Calibração do TLD-700 (ROI-1) para nove distancias.

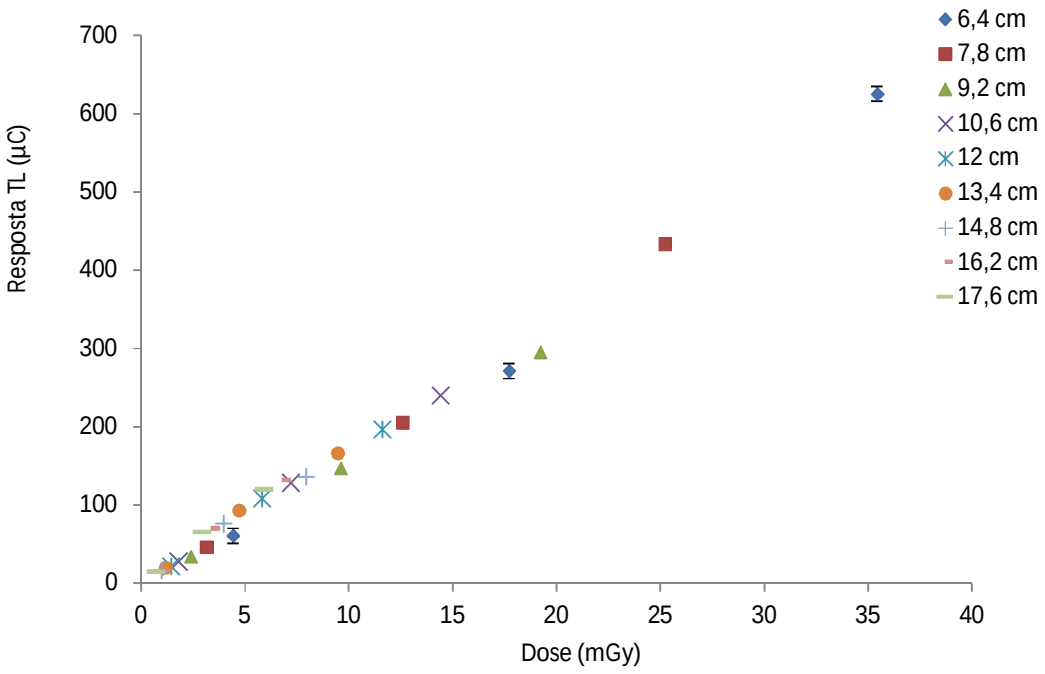

Figura 47. Curvas de Calibração do TLD-400 para nove distancias.

As curvas apresentadas nas Figura 45 e Figura 46 expressam a relação do sinal TL na primeira região de interesse e a dose total depositada nos TLDs calculada a partir do MCNP. Para discriminar a contribuição dos nêutrons na dose total depositada nos TLDs, foi construída a curva de calibração a partir da diferença entre a primeira região de interesse (ROI 1) do TLD-100 e do TLD-700, e a estimativa de dose devido à nêutrons. Como o TLD-100 e 700 apresentaram respostas similares a radiação gama, e o TLD-700 apresenta pouca sensibilidade aos nêutrons, à diferença entre a resposta TL do TLD-100 e do TLD-700 é atribuída à contribuição dos nêutrons.

Foi construído uma curva de calibração para segunda região de interesse do TLD-100 para verificar o uso da segunda região de interesse como estimativa de dose de nêutrons em campos mistos. Esses valores são apresentados no anexo G.

A partir dos dados apresentados nas Figuras 40 e 42, e de estimativas de dose depositada no TLD-100 devido a nêutrons foi possível obter nove curvas de calibração. Para melhor visualização a

Figura 48 apresenta apenas as quatro curvas de calibração mais distinguíveis.

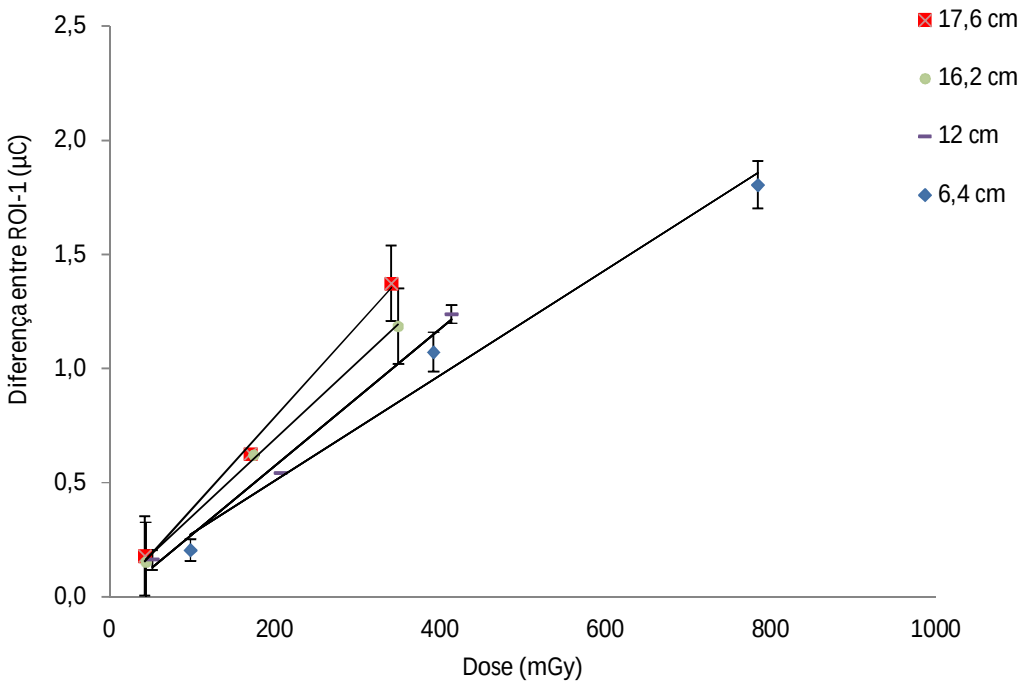

Figura 48. Curvas de calibração para nêutrons, construída a partir da diferença de resposta do ROI-1 dos TLDs de LiF.

Os parâmetros da função ajustada foram:

$$y = A + B.x$$

Tabela 8. Parâmetros da calibração linear para valores apresentados na Figura 48.

Parâmetro	**6,4 cm**	**12,0 cm**	**16,2cm**	**17,6cm**
A (µC)	(0,049 ± 0,015)	(-0,024 ± 0,069)	(0,016 ± 0,022)	(-0,017 ± 0,005)
B (µC/mGy)	(0,0023 ± 0,0003)	(0,0029± 0,0002)	(0,0034 ± 0,0001)	(0,0039 ± 0,0004)
R^2	0,97	0,98	0,99	0,99

A obtenção de quatro curvas de calibração diferentes mostra que para campos com espectros diferentes se obtém curvas diferentes, o que pode interferir na dosimetria TL para campos mistos, quando a calibração é feita sob um campo com dado espectro energético e utilizado para medidas em campos mistos com espectro energético diferente. Na proposição desse trabalho busca-se relacionar o espectro energético do campo misto com a razão entre as duas regiões de interesse dos TLDs de LiF, ROI2/ROI1. Uma

comparação sobre a necessidade de curvas diferentes para diferentes relações ROI2/ROI1 estão apresentadas no anexo D.

5.6 Variação da razão entre as duas regiões de interesse com a variação do fluxo relativo gama e nêutrons.

Visto que as curvas termoluminescentes dos TLDs de LiF apresentam duas regiões de interesse, buscou-se estabelecer uma relação entre o fluxo relativo de gama e nêutrons, com a razão entre o ROI-2 e o ROI-1. Como a contribuição no sinal TL do ROI-1 está relacionada à deposição de dose devido a nêutrons e gama, e no ROI-2 majoritariamente devido a nêutrons térmicos, a variação do fluxo relativo obtida no Irradiador 03 deve ser seguida da variação no valor entre a razão dessas duas regiões.

No irradiador 03 a relação entre o fluxo de nêutrons térmicos e o fluxo de radiação gama, varia em função da distância conforme perfil calculado com o MCNP 5, apresentado na Figura 16.

A Figura 53 e Figura 54 apresentam os valores da razão entre o ROI-2 e o ROI-1 para as respostas termoluminescentes dos TLDs posicionados em diferentes posições do irradiador 03. Cada ponto do gráfico foi obtido pela média das respostas

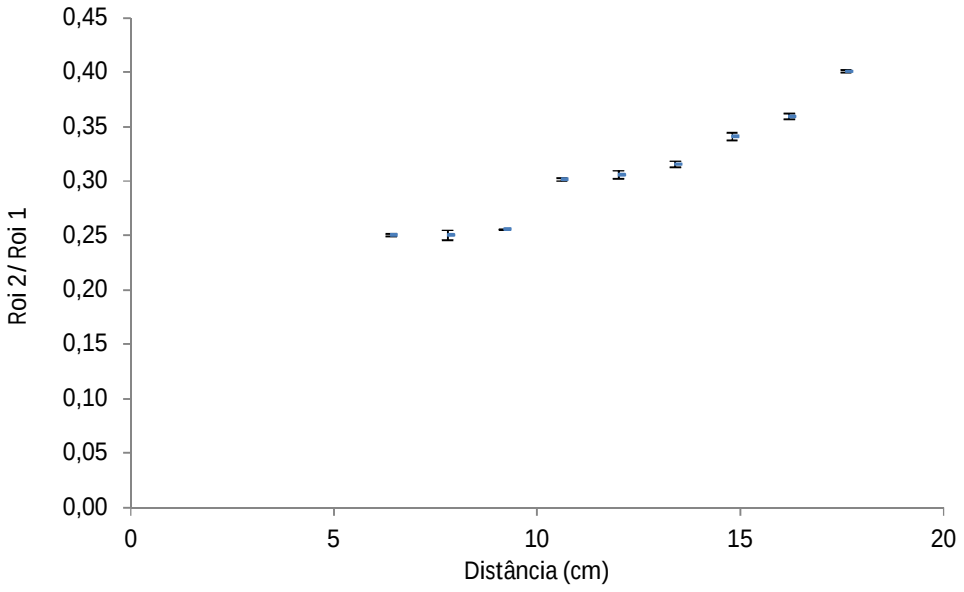

Figura 49. A razão entre ROI-2/ROI-1 do TLD-100 obtidas no Irradiador 03.

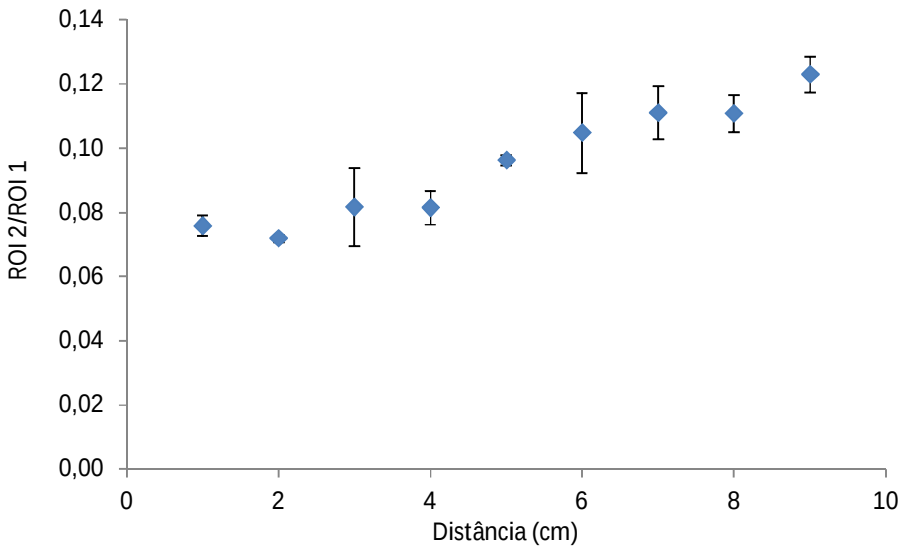

Figura 50. A razão entre ROI-2/ROI-1 do TLD-700 obtidas no Irradiador 03.

O valor da razão ROI2/ROI1 aumenta com a distância para o TLD-100 e TLD-700. Este aumento está associado à variação do fluxo relativo, gama e nêutrons térmicos, uma vez que a resposta no ROI-2 aumenta em relação ao ROI-1 para maiores distâncias devido ao fluxo relativo de nêutrons térmicos também aumentar com a distância.

Algumas regiões apresentaram valores próximos para razão ROI2/ROI1, indicando uma condição de fluxo relativo similar.

A razão entre os ROIs dos TLDs de LiF pôde ser associada ao perfil do campo misto. Alguns pontos do campo no irradiador 03 têm o fluxo relativo gama e nêutron bem distintos. A característica ou perfil do fluxo relativo influencia na composição da deposição de dose, e consequentemente na relação entre os ROIs. A Figura 51 e a Figura 52 apresentam para as posições de irradiação no Irradiador 03, uma relação entre a razão entre os ROIs e a razão entre a deposição de dose devido a nêutrons pela dose devido a radiação gama.

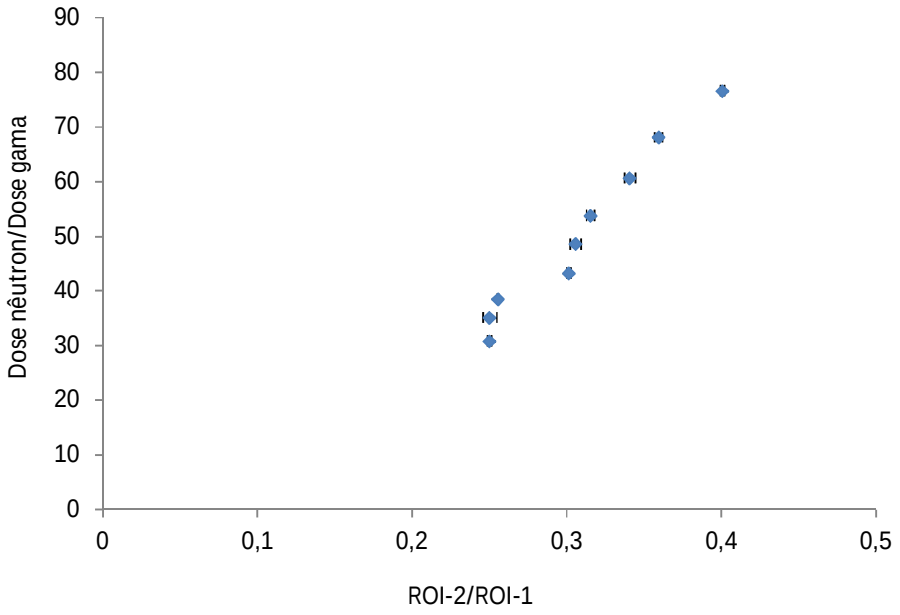

Figura 51. Relação entre a composição de dose e a razão entre os ROIs do TLD-100, obtidas no irradiador 03.

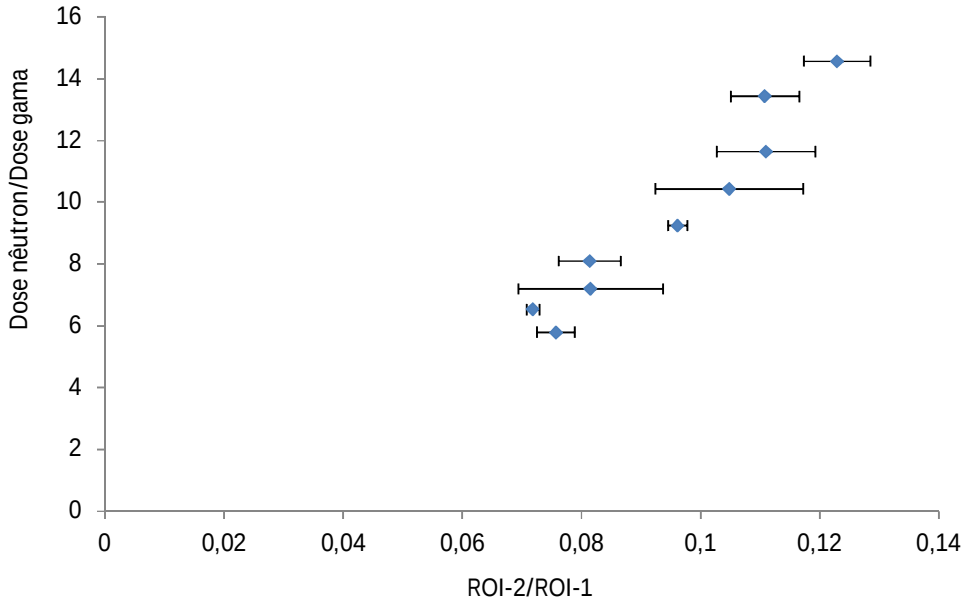

Figura 52. Relação entre a composição de dose e a razão entre os ROIs do TLD-700, obtidas no irradiador 03.

A razão ROI-2/ROI-1 pôde ser relacionada com a composição da deposição de dose nos TLDs irradiados no Irradiador 03. Nas regiões onde a deposição de dose nêutron é maior a razão entre os ROIs também é maior.

O valor da razão entre os ROIs dos TLDs de LiF pode servir como um parâmetro para escolha de uma dada curva de calibração. A curva de calibração obtida em um campo misto em que os TLDs apresentaram um dado valor para razão ROI2/ROI1, possivelmente pode ser utilizada em outros campos mistos que apresentam os mesmos valores para razão ROI2/ROI1.

Os valores obtidos para o TLD-700 apontam para a sensibilidade desse tipo de TLD a componente térmica do campo. Em dosimetria TL de campos mistos usando o TLD-700 e outro dosímetro com maior sensibilidade a nêutrons, se assume que o TLD-700 não é sensível a nêutrons ou que essa sensibilidade é desprezível. Porém os valores obtidos com o TLD-700 sugerem que desconsiderar a sensibilidade aos nêutrons desse tipo de TLD, pode incorrer na subestimação no valor da dose devido a nêutrons.

5.7 Irradiação na Instalação de BNCT.

Os TLDs também foram irradiados na instalação de BNCT, que está instalada ao longo do extrador de feixe (*BH 1-Beam Hole*) do reator IEA-R1. As irradiações foram feitas em duas condições de operação, com o reator operando em baixa potência, 100 kW e em alta potência, 4,5 MW.

As estimativas de dose de nêutrons são dadas pelas equações 5.1 e 5.2. Estas equações foram obtidas a partir da curva de calibração de duas posições no irradiador 02, posição de 6,4 cm e 17,6 cm, apresentadas na

Figura 48.

$$D(mGy) = \frac{R_{TLD100-TLD700}(uC) - (0{,}049 \pm 0{,}015)}{(0{,}0023 \pm 0{,}0003)} \qquad \text{Equação 5.1}$$

$$D(mGy) = \frac{R_{TLD100-TLD700}(uC) + (0{,}017 \pm 0{,}005)}{(0{,}0039 \pm 0{,}0004)} \qquad \text{Equação 5.2}$$

A dose gama foi estimada com base na calibração do TLD-700 no campo gama puro obtido no ^{60}Co.

$$D(mGy) = R_{TLD700}(uC) \times (21{,}98 \pm 0{,}10) \qquad \text{Equação 5.3}$$

5.7.1 IRRADIAÇÃO EM BAIXA POTÊNCIA.

Os dados apresentados na Figura 53 e na Figura 54 são referentes às duas regiões de interesse dos TLDs de LiF (ROI-1 e ROI-2), sendo cada ponto obtido pela resposta média de seis TLDs. Foram realizadas três irradiações, com períodos distintos de 5, 10 e 22 minutos, com o Reator operando em baixa potência, 100 kW.

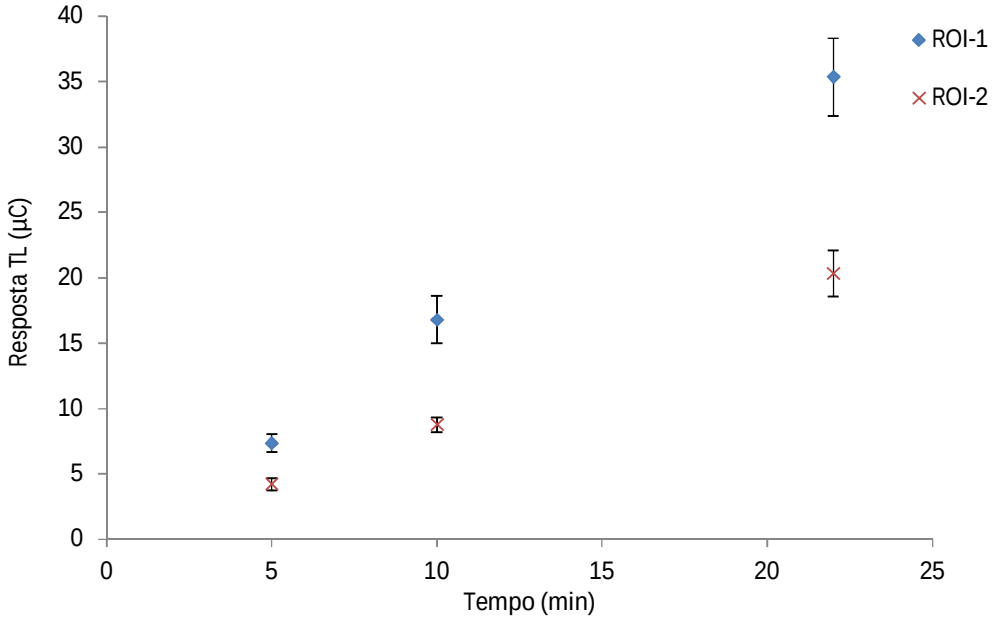

Figura 53. Resposta TL de duas regiões de interesse do TLD-100.

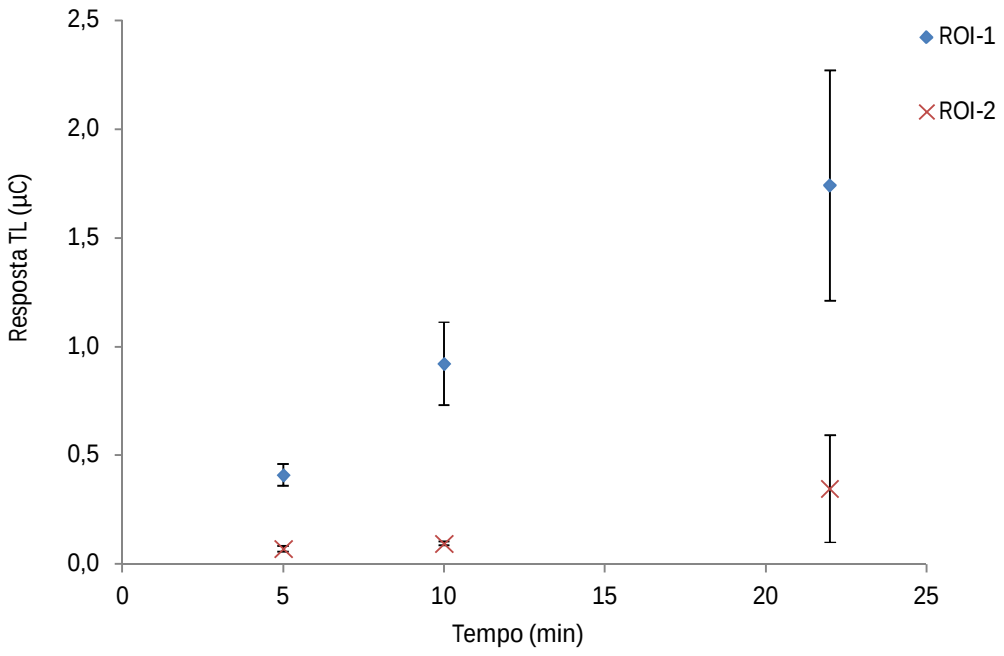

Figura 54. Resposta TL de duas regiões de interesse do TLD-700.

A Figura 55 apresenta a resposta média de seis TLDs 400 para cada uma das três irradiações, com períodos de 5, 10 e 22 minutos.

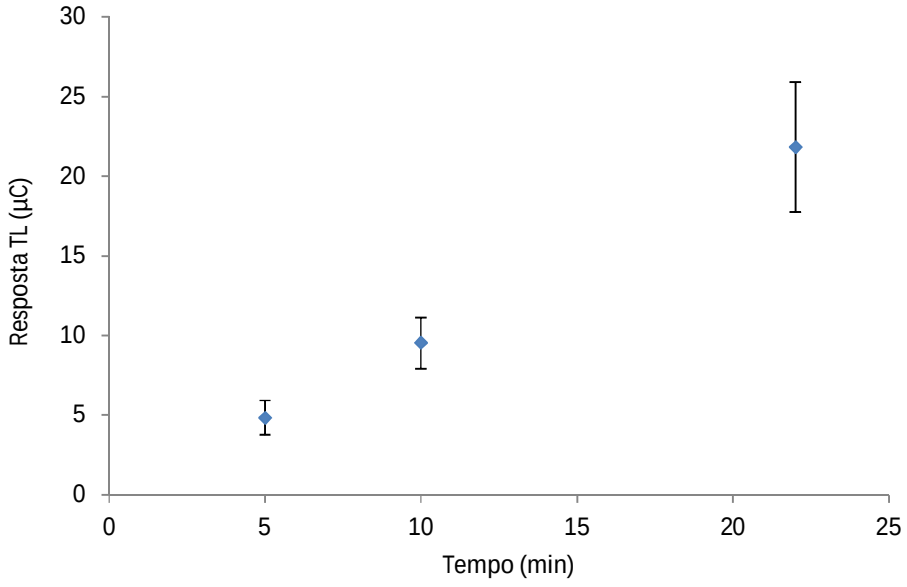

Figura 55. Resposta TL média de seis TLD-400.

Utilizando as equações apresentadas na seção 5.7 para dosimetria do feixe de irradiação da instalação de BNCT, foi obtido para radiação gama a taxa de dose de 0,11 ± 0,01 mGy/h.

O valor da taxa de dose de nêutrons obtido usando a curva para 6,4 cm e 17,6 cm foi respectivamente 39,0 ± 2,7 Gy/h e 0,12 ± 0,02 Gy/h.

5.7.2 IRRADIAÇÃO EM ALTA POTÊNCIA

Os dados apresentados na Figura 56 e na Figura 57 são referentes às duas regiões de interesse dos TLDs de LiF (ROI-1 e ROI-2), sendo cada ponto obtido pela resposta média de três TLDs. Foram realizadas três irradiações, com períodos distintos de 3, 6 e 12 minutos, com o Reator operando em alta potência, 4,5 MW.

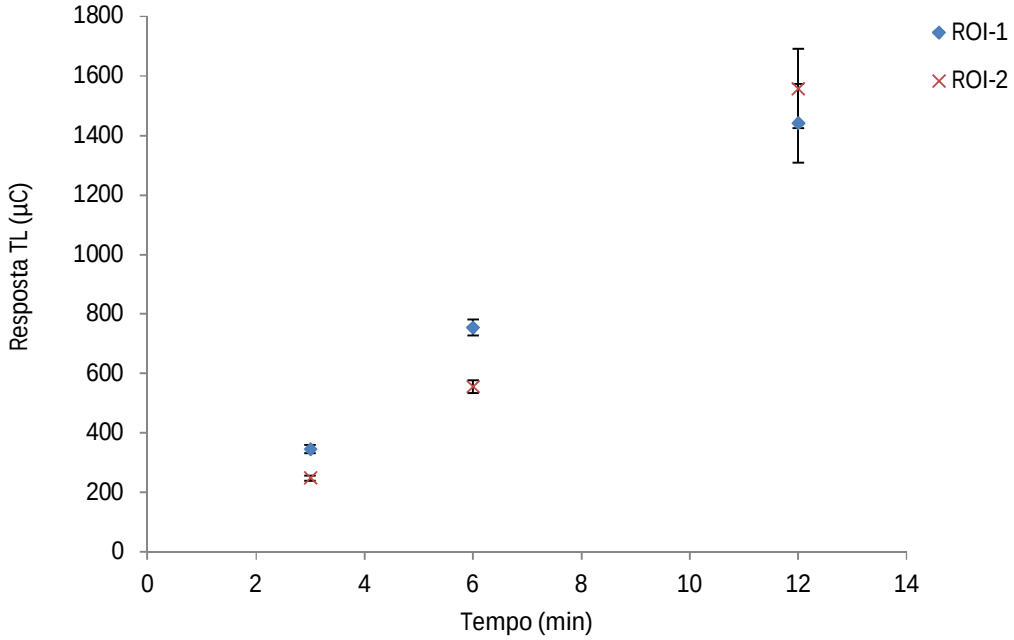

Figura 56. Resposta TL para duas regiões de interesse do TLD-100.

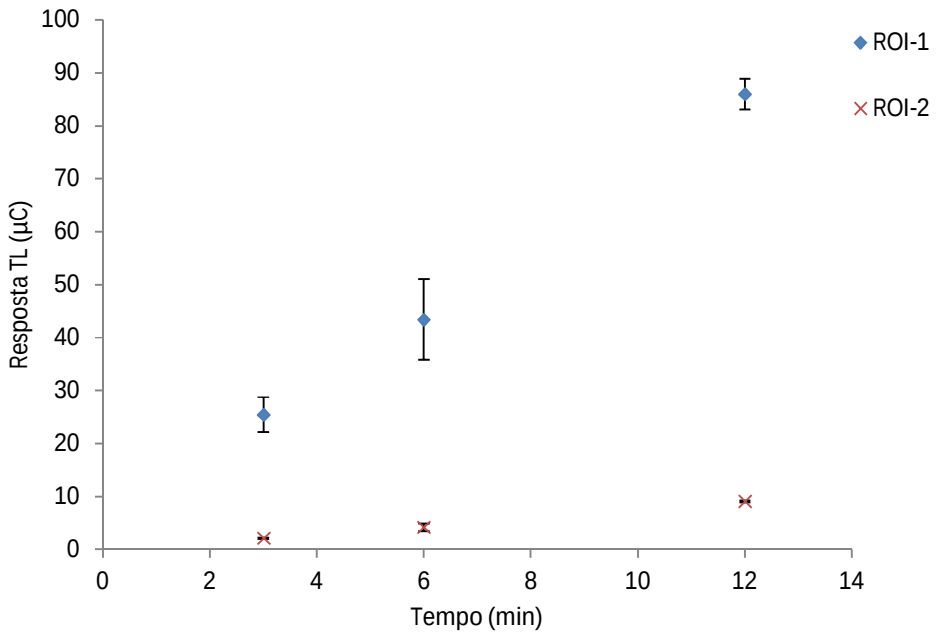

Figura 57. Resposta TL de duas regiões de interesse do TLD-700.

A Figura 58 apresenta a resposta média de três TLDs 400 para cada uma das três irradiações, com períodos de 3, 6 e 12 minutos.

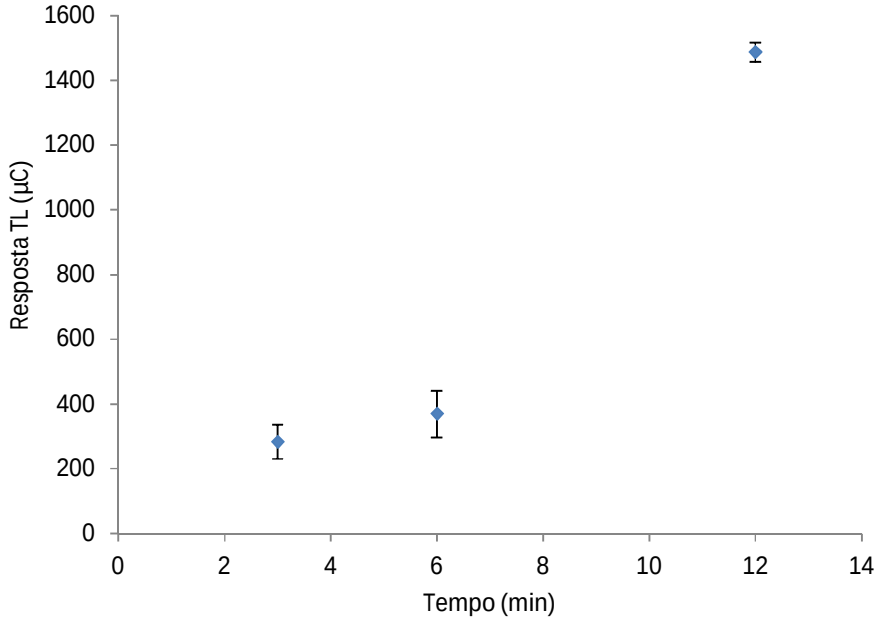

Figura 58. Resposta média do TLD-400.

Utilizando as equações apresentadas na seção 5.7 para dosimetria do feixe de irradiação da instalação de BNCT, foi obtido para radiação gama a taxa de dose de 10,05 ± 0,98 Gy/h. As taxas de dose de nêutrons obtidas usando a curvas para 6,4 cm e 17,6 cm foram respectivamente 2,94 ± 0,16 kGy/h e 6,8 ± 0,34 Gy/h.

6 CONCLUSÃO.

O irradiador que foi construído nesse trabalho, Irradiador 03, está dentro das expectativas do projeto. O campo obtido no interior do Irradiador 03 tem um fluxo relativo gama e nêutron diferente para cada posição, e pode ser usado na continuação dos estudos para verificar como os diferentes tipos de TLDs têm sua resposta TL afetada pela modificação nas componentes do campo.

O par TLD-700 e TLD-100 pode ser usado na dosimetria TL de campos mistos como alternativa ao par TLD-700 e TLD-600. A concentração de ^{6}Li no TLD-100 é menor do que no TLD-600, essa baixa concentração permite o TLD-100 ter boa sensibilidade aos nêutrons térmicos, mesmo em baixo fluxo, e evita uma rápida saturação na resposta no alto fluxo obtido na instalação de BNCT. Um parâmetro para decisão entre qual par de TLDs de LiF deve ser utlilizado na dosimetria de campos mistos, pode ser o fluxo de nêutrons térmicos. Para um campo misto de baixo fluxo, como o obtido da fonte de ^{241}AmBe, o par de TLD-700 e TLD 600 pode ser mais adequado devido ao TLD 600 ser mais sensível a nêutrons do que o TLD-100. Para um campo misto com alto fluxo de nêutrons térmicos, como os obtidos na instalação de BNCT, o par TLD-700 e TLD-100 pode ser mais adequado pelo fato do TLD-100 apresentar a perda da linearidade menos rapidamente do que o TLD-600.

O TLD-700 apresentou significativa sensibilidade aos nêutrons térmicos, pelo observado nas irradiações em campos misto. A sensibilidade para nêutrons apresentada pelo TLD-700 pode contribuir na subestimação da dose de nêutrons, pois a medida que o fluxo de nêutrons aumenta, a resposta do TLD-700 passa a corresponder mais significativamente à dose depositada pelos nêutrons, e a simples subtração da resposta dos TLDs pode incorrer em imprecisão nas medidas. Portanto o uso do TLD-700, em dosimetria de campos mistos pode ser melhorado por se quantificar a contribuiçao da dose de nêutrons na sua resposta TL.

O TLD-400 apresentou boa reprodutibilidade e linearidade para as condições de irradiação em campos mistos e gama. Entretanto o espectro de nêutrons influencia significativamente sua resposta TL. Este fato dificulta o uso do TLD-400 para dosimetria gama em campos mistos gama e nêutron, uma vez que seu uso depende de entender como cada componente do campo influencia na sua resposta luminescente.

O estudo da reprodutibilidade em campos gama puro e mistos mostrou que, um TLD tem resposta diferente em relação às respostas de outros TLDs de mesmo tipo, e em relação a sua resposta em outras irradiações de mesma dose. Tanto para o campo

gama bem como para o campo misto gama e nêutron, a reprodutibilidade de um TLD é melhor que a do grupo. A dispersão nas respostas está relacionada com a eficiência de resposta intrínseca de cada TLD e aos processos envolvendo o ciclo de irradiação e leitura. Pode-se obter uma melhor precisão nas medidas fazendo um selecionamento dos TLDs com respostas semelhantes, ou aplicando um fator de correção na resposta dos TLDs levando em consideração a eficiência individual de cada dosímetro. Como a resposta do TLD depende do tipo de campo, o selecionamento serviria apenas para o campo em que ele foi selecionado. O selecionamento ainda implicaria na redução do número de TLDs e possivelmente geraria custo na aquisição de novos.

Como alternativa ao selecionamento foi criado um fator de correção para as respostas individuais, o Fator de Correção de Eficiência. A criação desse fator de correção nas respostas TL para cada um dos campos de irradiações permitiu uma melhor precisão nas medidas, porém há a necessidade de se criar um Fator de Correção para cada campo com espectros energéticos diferentes.

Os procedimentos adotados durante os processos de tratamento, irradiação e leitura, como a adoção de um ciclo, transportar e armazenar os TLDs abrigados da luz, evitar submetê-los a grandes variações térmicas, também contribuíram para redução da dispersão nas respostas associadas aos processos de medida, uma vez que variações na temperatura ambiente ou a incidência de fótons de luz, em especial no TLD-400, causam o desarmadilhamento de elétrons, reduzindo a resposta TL.

A razão ROI-2 pelo ROI-1 pode indicar a curva de calibração mais adequada para o campo misto em questão. Nas condições criadas no Irradiador 03, o fluxo relativo gama e nêutron, varia com a distância. Essa variação foi associada com a razão entre as respostas do ROI-2 pelo ROI-1. Em cada uma das nove posições se obteve uma curva de calibração distinta, sendo que cada curva pode ser associada a um valor da razão entre os ROIs. Levando em consideração a incerteza dos TLDs foi apresentado dentre as nove curvas, quatro curvas para quatro espectros energéticos distintos. Portanto a utilização de uma curva de calibração para estimativa de dose de nêutrons em campo misto com espectro energético diferente da qual foi calibrada pode apresentar erro na estimativa da dose no TLD, sendo que a curva mais adequada pode ser a obtida em um campo misto que apresente o mesmo valor na razão entre os ROIs.

Na comparação entre o irradiador 02 e 03 não foi possível obter uma curva de calibração equivalente. A falta de identidade na comparação da curva do irradiador 02 com uma das curvas obtidas no irradiador 03, talvez seja pelo fato de que a curva do

Irradiador 02 ter sido obtida estimando os valores a partir da resposta obtida para 24h de irradiação, considerando a linearidade das respostas TL. A obtenção dos outros valores experimentais para irradiador 02 possivelmente gerará uma curva de calibração coincidente a uma das curvas de calibração do irradiador 03, que apresente um valor similar na razão entre os ROIs.

Na instalação de BNCT foi estimado a taxa de dose nêutrons no TLD usando duas curvas de calibração obtidas no irradiador 03, que apresentaram valores distintos. Essa divergência indica a inviabilidade do uso das curvas de calibração feitas no irradiador 03, para estimativa de dose nêutrons no TLD irradiados na instalação de BNCT. A estimativa de taxa de dose gama no TLD apresentada nesse trabalho para irradiação em alta potência é de 10,06 Gy/h, e a taxa de dose de nêutron no TLD para mesma potência pode variar de 6,8 Gy/h á 2,94 kGy/h, dependendo da curva escolhida. Não está se supondo que a taxa de dose nêutrons no TLD esteja entre estes valores apresentados, eles apenas ilustram a divergência que pode ocorrer na estimativa de dose ao usar curvas de calibração obtidas em regiões com espectro energéticos diferentes.

Portanto o uso dos dosímetros termoluminêscentes na dosimetria de nêutrons térmicos na instalação de BNCT, baseada na calibração dos dosímetros em outra fonte de neutrôns pode incorrer em grande imprecisão, e seu uso depende de entender o comportamento dos TLDs em campos mistos de alto fluxo, como o obtido na intalação de BNCT.

7 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.

As características do Irradiador construído neste trabalho permitem o estudo da dependência energética dos TLDs em relação ao espectro de nêutrons e de radiação gama. Entretanto, em relação a resposta TL para nêutrons parece sofrer maior influência do fluxo de nêutrons térmicos. Dessa forma seu comportamento em baixo e alto fluxo de nêutrons parece ser diferente.

No irradiador é possível usar fontes com as outras atividades ou mais de uma fonte, e verificar como o fluxo de nêutrons influencia na resposta TL. Esse comportamento é discutido no anexo C para o TLD-400.

Em relação à fonte de AmBe será necessária uma avaliação da contribuição de fótons de menor energia na dose depositada no TLD. Isso poderá ser feito usando algumas blindagens entre os dosímetros e a fonte, usando o Irradiador 03.

A comparação entre as curvas do Irradiador 02 e uma curva do Irradiador 03, cuja razão entre o ROI-2 e ROI-1 seja similar, depende de obter mais dados experimentais. A obtenção de novas curvas nos dois irradiadores permitirá uma comparação mais detalhada e a validação do método de escolha de uma curva de calibração em baixo fluxo de nêutrons.

Os dados para taxa de dose obtidos na instalação de BNCT não puderam ser comparados com outras medidas experimentais a fim de se ter um parâmetro comparativo. Os dados obtidos com TLD na instalação de BNCT devem ser relacionados a medidas dosimétricas usando outros tipos de dosímetros para gama e nêutrons, juntamente com os valores obtidos por simulação no MCNP.

Um entendimento maior do comportamento dos TLDs no alto fluxo pode ser obtido projetando-se um Irradiador para usar na instalação de BNCT, e que permita condições controladas de fluxo de nêutrons e de radiação gama.

O comportamento do TLD-700, sensibilidade a gama e baixa sensibilidade a nêutrons aponta um potencial para seu uso na dosimetria de nêutrons em campos mistos, sem um par de dosímetro, como convencionalmente é feito. Essa metodologia dependeria de se quantificar a contribuição da dose nêutrons nesse tipo de dosímetro.

8 BIBLIOGRAFIA

[1] INCA-Instituto Nacional do Câncer, “Intituto Nacional do Câncer”. Disponível em: http://www.cancer.gov/cancertopics/what-is-cancer. Acesso em 10 Abril 2015.

[2] Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva, “INCA,” Coordenação de Prevenção e Vigilância, Rio de Janeiro. Disponível em : http://www2.inca.gov.br/wps/wcm/connect/cancer/site/oquee. Acesso em 25 02 2014.

[3] Muniz, R. Desenvolvimento de um Simulador Antropomórfico para Simulação e Medida de Dose e Fluxo de Nêutrons na Instalação para Estudos em BNCT (Mestrado): Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP, 2010.

[4] Cavalieri, T. A. *Emprego do MCNP no Estudo do TLDS 600 E 700 Visando a Implementação da Caracterização do Feixe de Irradiação da Instalação de BNCT do IEA-R1*.(Mestrado): Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN/SP, 2013.

[5] Locher G. L. “Biological Effects and Therapeutic Possibilities of Neutrons,” *The American Journal of Roentgenology and Radium Therapy,* vol. 36, n. 1, 1936.

[6] Campos T. P. R, “Considerações sobre a Terapia de Captura de Nêutrons pelo Boro,” *Revista Brasileira de Cancerologia,* vol. 46(3), pp. 283-92, 2000.

[7] Heikki J., “Boron neutron capture therapy of brain tumors: clinical trials at the Finnish facility using boronophenylalanine,” *Journal of Neuro-Oncology,* p. 62: 123–134, 2003.

[8] Mishima Y. Honda C., Ichihashi M., Obara H., Hiratsuka J., Fukuda H., Karashima H., Kobayashi T., Kanda K.e Yoshino K., “Treatmente of Malignant Melanoma by Single Thermal Neutron Capture Therapy with Melanoma-Seeking 10B Compound,” *The Lancet,* vol. 334, pp. 388-389, 1989.

[9] Moss R., Aizawa O., Beynon D., Brugger R., Constantine G., Harling O., Liu H.e Watkins P., “The Requirements and Development of Neutron Beams for Neutron Capture Therapy of Brain Cancer,” *Journal of Neuro-Oncology,33,* pp. 27-40, 1997.

[10] Rolf B. F., Jeffrey C. e Graças V. M., “Boron Neutron Capture Therapy of Cancer: Current Status and Future Prospects Clin. Cancer,” Published online June 1, 2005.

[11] Statkin D., “A history of Boron nêutron capture therapy of brain tumors Brain,” pp. 114:1609-1629, 1991.

[12] ROGUS R. D., Design and dosimetry of epithermal neutron beams for clinical trials of boron neutron capture therapy at MITR reactor (Thesis), Massachusetts: MIT, 1994.

[13] UJENO Y., Clinical experience of BNCT for brain and skin tumors at Kyoto University reactor, in progress in neutron capture therapy for cancer., New York: Plenum Press, 1992.

[14] R.,. S. G. &. K. l. W. Zamenhof, “Clinical Treatment planning of subjects undergoing boron neutron capture therapy.,” *Advances in Neutron Capture Therapy,* vol. Vol ll, 1997.

[15] Nakagawa Y. e Hatanaka H., “Recent Study of Born Neutron Capture Therapy in Patient with Malignant Tumor,” em *6th Int. Symp. on Neutron Capture Therapy*, Kobe, Japão, 1995.

[16] Gaspar F., *Considerações sobre o estudo da BNCT (Terapia de Captura Neutrônica por boro).* (Mestrado): Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN/SP, 1994.

[17] Coelho P. R. *Radiation field characterization of the BNCT research facility at IEA-R1,* Florença: Proceedings 13th International Congress on Neutron Capture Therapy, ENEA – Italian National Agency for New Technologies, Energy and the Environment, vol.1, p. 553-55., 2008.

[18] Souza G. S., Projeto e Implementação de Melhorias na Blindagem Biológica da Instalação para Estudos em BNCT (Mestrado) : Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN/SP, 2011.

[19] Castro V. A. Otimização do feixe de irradiação na instalação para estudos em BNCT junto ao reator IEA-R1(Mestrado): Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN/SP, 2014.

[20] Faião-Flores, Coelho P. R., Muniz R. , Souza G., Arruda-Neto J.e Maria D., “Antitumor Potencial Indication and Free Radicals Production in Melanoma Cells by Boron Neutron Capture Therapy,” *Applied Radiation and Isotopes,* vol. 69, pp. 1748-1751, 2011.

[21] Guedes S., Smilgys B., Vasconcellos H., Hadler J., Lixandrao A., Coelho P. R. e Siqueira P. T., “Thermal, Epithermal and Fast Neutron Dosimetry in BNCT Using Boron Thin Films and PADC Detector,” em *15th International Congress on Neutron Capture Therapy*, Tsukuba, Japão, 2012.

[22] I. Kaplan, Nuclear Physics, Addison Wesley, 1962.

[23] J. R. Lamarsh, Introduction to nuclear reactor theory. 2. ed., Addison-Wesley Publishing Company, 1972.

[24] L. F. Curtiss, Introduction to Neutron Physics, Princeton: Van Nostrand, 1959.

[25] J. Kopecky et al, “Atlas of Neutron Capture Cross Sections,” [Online]. Available: http//www-nds.iaea.org/ngatlas2/. [Acesso em 15 06 2015].

[26] S. Mckeever, M. Moscovitch e P. Townsend, “Thermoluminescence Dosimetry Materials: Properties and Uses,” Nuclear Technology Publishing, Ashford, Kent, England, 1995.

[27] L. Tauhata, I. P. A. Salati, R. D. Prinzio e A. Prinzio, Radioproteção e Dosimetria - Fundamentos, Rio de Janeiro , RJ: IRD/CNEN, 2003.

[28] M. Oberhofer e A. Scharmann, Applied Thermoluminescence Dosimetry, Ispra: Adam Hilger Ltd, 1979.

[29] J. Briesmeister, MCNP. A general Monte Carlo N-Particle transport code Version 5., Los Alamos: National Laboratory Report, 2001.

[30] Pacific Northwest National Laboratory, “Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling,” 2011.

[31] A. F. Bielajew, Fundamentals of the Monte Carlo Method for Neutral and Charged Particle Transport, Michigan: University of Michigan, 2001.

[32] X-5 Monte Carlo Team, “MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, V.5,” Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 2005.

[33] Japan Atomic Energy Agency, “Nuclear Data Center,” NDC, [Online]. Available: http://wwwndc.jaea.go.jp/j40fig/jpeg/li006_f1.jpg. [Acesso em 01 07 2014].

[34] Massillon-JL G., “Influence of phantom materials on the energy dependence of LIF:Mg,Ti thermoluminescent dosimeters exposed to 20-300 kV narrow x-ray spectra, 137Cs and 60Co photons.,” *Phys. Med. Biol.*, vol. 59, pp. 4149-4166., 2014.

[35] Harshaw TLD, “Materials and Assemblies for Thermoluminescence Dosimetry”.

[36] Junior V. C., Caracterização do Campo de Nêutrons na Instalação para Estudo em BNCT no Reator IEA-R1 (Mestrado), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN/SP, 2008.

[37] Isao Murata H. M., "Neutron and gamma-ray source-term characterization of AmBe sources in Osaka University.," *Progress in Nuclear Science and Techonology,* pp. Vol 4 pp. 345-348, 2014.

[38] International Atomic Energy Agence, "Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purpose," Vienna, 2001.

[39] Gambarini G., Klamert V., Agosto S., Birattari C., Gay S. e Rosi G., "Study of a Method Based on TLD Detectors for In-Phantom Dosimetry in BNCT," *Radiation Protection Dosimetry,* vol. 110, pp. 631-636, 2004.

[40] IPEN, "Instituto de Pesquisas Energética e Nucleares - IPEN," 2011. Disponível em: http://www.ipen.br/sitio/index.php?idm=248. [Acesso em 28 Julho 2012].

[41] Hatanaka H., Kamano S. e Amaro K., "Clinical Experience of Boron-Neutron Capture Therapy for Gliomas: A Comparison with Conventional Chemo-Immune-Radiotherapy," em *Boron-Neutron Capture Therapy for Tumors*, Niigata, Japão, 1986.

[42] T. L., Radioproteção e Dosimetria-Fundamentos, Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2003.

ANEXO A: FATOR DE NORMALIZAÇÃO PARA OS TLDS.

Nas medidas TL feitas nesse trabalho as incertezas foram relacionadas a duas fontes.

A primeira fonte de incerteza se relaciona aos processos ou ciclos de tratamento, irradiação e leitura (Anexo B).

A segunda fonte está relacionada à diferença na sensibilidade individual de cada TLD. Comparando resposta individual de cada TLD em relação à resposta média de um grupo de TLDs foi possível verificar que um TLD apresenta um desvio sistemático em relação à média.

O valor médio nesse desvio gera um fator que foi usado para correção das respostas, obtendo-se uma melhor estimativa na medida. Este fator foi nomeado como Fator de Correção de eficiência, e sua definição e nomenclatura foram utilizadas como utilizadas em trabalhos anteriores feitos pelo grupo de BNCT-IPEN/CEN [4].

A seguir são apresentados os valores de FN e de σ_{FN} para os TLDs utilizados nesse trabalho, obtidos para o campo gama, fonte de ^{60}Co e para os campos mistos utilizando a fonte de AmBe.

Tabela 9. Fatores de Normalização do TLD-100.

FATORES DE NORMALIZACÃO - TLD-100										
TLD			IRRADIAÇAO NO ^{60}Co		(AmBe) IRRADIADOR 2				(AmBe) IRRADIADOR 3	
-	ROI-1	INCERTEZA	ROI-1	INCERTEZA	ROI2	INCERTEZA	ROI1	INCERTEZA	ROI2	INCERTEZA
1	1,078	0,006	1,077	0,012	1,062	0,009	1,171	0,028	1,13	0,025
2	0,842	0,037	0,854	0,032	0,883	0,026	0,906	0,024	0,92	0,180
3	0,866	0,033	0,889	0,025	0,892	0,024	0,959	0,013	0,97	0,191
4	1,039	0,001	1,008	0,002	0,994	0,004	0,814	0,042	0,84	0,164
5	0,954	0,017	0,987	0,006	0,989	0,005	1,129	0,020	1,11	0,218
6	0,943	0,019	0,941	0,015	0,959	0,011	1,130	0,020	1,11	0,217
7	1,056	0,002	1,003	0,003	1,002	0,003	1,388	0,071	0,83	0,163
8	0,842	0,038	0,886	0,026	0,907	0,021	0,879	0,029	0,89	0,175
9	1,155	0,021	1,103	0,017	1,044	0,005	1,127	0,020	1,09	0,214
10	0,855	0,035	0,932	0,017	0,952	0,013	1,068	0,008	1,06	0,208
11	1,089	0,008	1,105	0,017	1,057	0,008	0,895	0,026	0,91	0,179
12	1,082	0,007	1,034	0,003	1,002	0,003	1,056	0,006	1,04	0,204
13	1,034	0,002	1,010	0,001	1,014	0,001	0,969	0,011	0,96	0,189
14	1,107	0,012	1,062	0,009	1,050	0,006	1,034	0,002	1,06	0,209
15	1,065	0,004	1,081	0,013	1,050	0,007	1,000	0,005	0,98	0,192
16	0,845	0,037	1,015	0,000	1,069	0,010	0,934	0,018	0,95	0,186
17	1,076	0,006	1,257	0,047	1,228	0,042	1,132	0,021	1,13	0,222
18	1,069	0,005	1,099	0,016	1,078	0,012	0,956	0,014	0,94	0,185
19	0,864	0,033	1,020	0,001	1,059	0,008	0,980	0,009	0,99	0,195
20	0,846	0,037	1,105	0,017	1,124	0,021	1,119	0,018	1,09	0,213
21	0,885	0,030	0,880	0,027	0,888	0,025	0,921	0,021	0,93	0,183
22	0,858	0,035	0,840	0,035	0,871	0,029	0,884	0,028	0,85	0,167
23	1,127	0,015	1,057	0,008	1,089	0,014	1,090	0,012	1,12	0,220
24	1,109	0,012	1,063	0,009	1,038	0,004	1,052	0,005	1,07	0,210
25	1,094	0,009	1,040	0,005	1,027	0,002	1,228	0,040	0,90	0,177
26	1,130	0,016	1,088	0,014	1,102	0,017	0,962	0,013	1,15	0,225
27	1,973	0,173	1,006	0,002	1,016	0,000	0,920	0,021	1,11	0,218
28	1,203	0,030	-	-	-	-	-	-	-	-
29	1,144	0,019	-	-	-	-	-	-	-	-
30	1,092	0,009	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 10. Fatores de Normalização do TLD-400

FATORES DE NORMALIZAÇÃO-TLD-400						
TLD	IRRADIAÇÃO NO ^{60}Co		(AmBe) IRRADIADOR 2		(AmBe) IRRADIADOR 3	
-	ROI-3	INCERTEZA	ROI-3	INCERTEZA	ROI- 3	INCERTEZA
1	0,951	0,177	0,961	0,008	0,961	0,008
2	1,085	0,202	1,019	0,003	1,019	0,003
3	1,084	0,201	1,023	0,004	1,023	0,004
4	0,960	0,178	0,994	0,002	0,994	0,002
5	0,969	0,180	0,957	0,009	0,957	0,009
6	1,022	0,190	1,054	0,010	1,054	0,010
7	1,038	0,193	0,978	0,005	0,978	0,005
8	0,991	0,184	1,094	0,018	1,094	0,018
9	1,021	0,190	0,940	0,012	0,940	0,012
10	0,998	0,185	0,982	0,004	0,982	0,004
11	1,012	0,188	0,992	0,002	0,992	0,002
12	1,028	0,191	1,027	0,005	1,027	0,005
13	1,025	0,190	1,043	0,008	1,043	0,008
14	0,968	0,180	0,954	0,009	0,954	0,009
15	0,974	0,181	1,007	0,001	1,007	0,001
16	0,977	0,181	0,975	0,005	0,975	0,005
17	0,984	0,183	0,961	0,008	0,961	0,008
18	1,047	0,194	1,072	0,014	1,072	0,014
19	1,060	0,197	1,056	0,011	1,056	0,011
20	1,034	0,192	0,993	0,002	0,993	0,002
21	1,101	0,204	0,956	0,009	0,956	0,009
22	0,981	0,182	1,040	0,008	1,040	0,008
23	0,958	0,178	0,965	0,007	0,965	0,007
24	0,948	0,176	0,998	0,001	0,998	0,001
25	0,904	0,168	0,968	0,007	0,968	0,007
26	0,948	0,176	1,003	0,000	1,003	0,000
27	0,973	0,181	1,031	0,006	1,031	0,006
28	0,954	0,177	-	-	-	-
29	1,049	0,195	-	-	-	-
30	1,004	0,186	-	-	-	-

Tabela 11. Fatores de Normalização do TLD-700

FATORES DE NORMALIZAÇÃO – TLD-700										
TLD	IRRADIAÇAO - ^{60}Co		(AmBe) IRRADIADOR 2				(AmBe) IRRADIADOR 3			
-.	ROI-1	INCERTEZA	ROI- 1	INCERTEZAZA	ROI-2	INCERTEZA	ROI-1	INCERTEZA	ROI-2	INCERTEZA
1	1,12	0,021	1,12	0,020	1,44	0,079	0,94	0,013	1,06	0,010
2	0,97	0,006	0,94	0,015	1,03	0,002	0,83	0,035	0,82	0,161
3	1,01	0,001	1,00	0,004	0,99	0,009	1,39	0,074	1,20	0,236
4	1,15	0,027	1,11	0,019	1,23	0,039	1,03	0,005	0,96	0,188
5	1,09	0,016	1,04	0,005	1,29	0,049	0,96	0,008	1,02	0,200
6	1,12	0,021	1,09	0,015	1,33	0,057	1,01	0,000	1,02	0,201
7	1,11	0,019	1,06	0,009	1,25	0,042	1,06	0,010	1,10	0,216
8	1,06	0,011	1,03	0,002	1,26	0,044	0,98	0,005	1,06	0,208
9	1,03	0,005	1,01	0,001	1,01	0,006	0,97	0,008	0,87	0,171
10	0,98	0,005	0,94	0,014	0,92	0,023	1,02	0,003	1,10	0,215
11	1,00	0,000	1,03	0,002	0,96	0,016	1,03	0,004	0,98	0,193
12	0,90	0,019	0,93	0,016	0,91	0,026	0,95	0,011	0,94	0,184
13	0,96	0,009	0,95	0,012	0,93	0,021	1,00	0,001	1,00	0,196
14	1,01	0,001	0,96	0,011	0,91	0,024	1,02	0,003	1,00	0,197
15	0,95	0,011	0,93	0,017	0,84	0,039	0,98	0,005	1,00	0,196
16	0,95	0,009	1,06	0,009	1,02	0,003	0,98	0,006	0,95	0,186
17	1,01	0,001	1,11	0,018	1,05	0,003	1,01	0,001	1,06	0,207
18	0,99	0,002	1,14	0,024	1,10	0,013	1,02	0,002	1,01	0,198
19	0,94	0,012	1,07	0,011	0,95	0,017	0,97	0,007	0,90	0,176
20	0,98	0,004	1,14	0,025	1,17	0,025	1,03	0,005	1,09	0,214
21	0,95	0,010	0,92	0,019	0,87	0,033	1,00	0,001	1,03	0,202
22	1,02	0,002	0,96	0,010	0,91	0,024	1,04	0,007	1,00	0,197
23	0,95	0,010	0,95	0,013	0,91	0,024	0,97	0,007	1,02	0,200
24	1,00	0,001	0,98	0,006	0,99	0,010	0,99	0,003	0,98	0,192
25	0,97	0,005	0,98	0,008	0,91	0,025	1,01	0,001	0,99	0,195
26	0,98	0,005	1,00	0,004	0,92	0,023	1,03	0,005	1,01	0,198
27	0,97	0,007	0,96	0,011	0,90	0,028	0,96	0,010	1,01	0,199
28	1,00	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-
29	0,98	0,005	-	-	-	-	-	-	-	-
30	0,98	0,004	-	-	-	-	-	-	-	-

ANEXO B: REDUÇÃO DAS INCERTEZAS ASSOCIADAS AOS CICLOS DE TRATAMENTO, IRRADIAÇÃO E LEITURA.

O tratamento térmico dispensado aos TLDs constitui uma parte importante no processo de detecção usando TLD e influencia na resposta obtida [34]. Para este trabalho foi adotado um sistema fixo de tratamento térmico, seção 4.3. O tratamento pré-radiação, as variações das condições ambientais na ocasião das medidas e após a irradiação também afetam as respostas dos TLDs. Essas influências aumentam a incerteza nas respostas dos dosímetros e está associado ao desarmadilhamento das cargas antes da leitura, processo conhecido como desvanecimento.

Os processos de desvanecimento são conhecidos pelo agente causador, por exemplo; desvanecimento óptico, desvanecimento térmico ou ainda desvanecimento anômalo quando a causa é desconhecida. Pelo aqui exposto é importante minimizar o desvanecimento ou (*fading*), evitando a subestimação da dose medida.

O desvanecimento térmico, por exemplo, ocorre principalmente quando a profundidade da armadilha é pequena. Nessa condição a probabilidade do desarmadilhamento aumenta com a temperatura, o que implica ter grande desvanecimento mesmo em temperatura ambiente, o que torna necessário alguns cuidados no armazenamento dos TLDs, entre o período da irradiação e leitura.

Nas irradiações em campos gama, ^{60}Co, os TLDs foram irradiados no Laboratório de Dosimetria Termoluminescente (LDT/IPEN). A leitura dos TLDs e tratamento térmico eram feitas no prédio do Reator IPEN/MB-01. O trajeto a pé entre esses dois centros é de aproximadamente 300 metros.

A temperatura média da sala em que a Leitora de TLD estava instalada, no interior do prédio do Reator MB-01/ IPEN, era de 23°C.

Para evitar o esvanecimento térmico, após a irradiação os TLDs eram mantidos nessa sala até a ocasião da Leitura.

A Figura 59 e a Figura 60 apresentam as médias das respostas de 30 TLDs em 10 irradiações distintas em condições similares, com a exceção de que na terceira irradiação os TLDS foram mantidos em outra sala não climatizada, externa ao prédio do Reator. Portanto os TLDs ficaram sujeitos à variação térmica do ambiente na terceira irradiação.

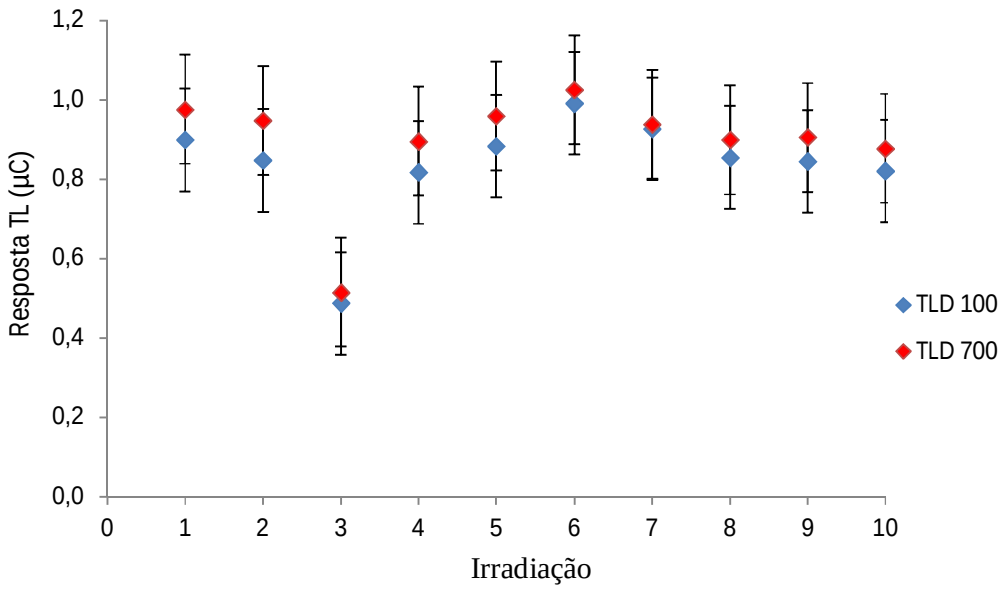

Figura 59. Média de 30 TLDs em 10 irradiações no ^{60}Co.

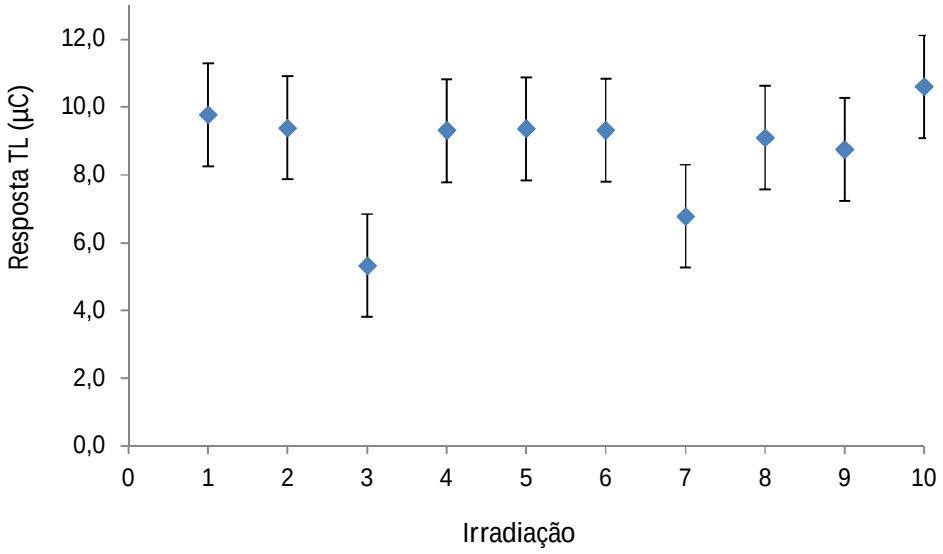

Figura 60. Média de 30 TLDs 400 em 10 irradiações no ^{60}Co.

Comparada a resposta da terceira irradiação com a média das respostas obtidas pelos TLDs de LiF e CaF_2, verificou-se que os TLDs tiveram uma redução média de 43% em sua resposta quando ficaram sujeitos as variações térmicas do ambiente.

No trajeto entre LDT/IPEN e o Reator IPEN/MB-01, os TLDs eram transportados abrigados da luz ambiente. Na ocasião da sétima irradiação os TLDs foram

expostos à luz ambiente durante o trajeto, e armazenados nas condições de temperatura controlada.

Os TLDs de LiF não sofreram variações nas suas respostas quando foram expostos à luz entre a irradiação e leitura. Os TLDs de CaF_2, sofreram uma redução de 26% na média de suas respostas.

O objetivo desse estudo não foi quantificar o quanto cada uma das grandezas relacionadas afeta a resposta dos dosímetros, porém dentro de uma amostra foi possível quantificar a influência de dois fatores nas flutuações das respostas em cada ciclo de leitura, uma vez que as condições de luminosidade e temperatura, variam entre as irradiações.

Com base nesse estudo foram tomadas algumas precauções no uso dos dosímetros. Os TLDs foram transportados e armazenados, abrigados da luz e protegidos de grandes variações térmicas.

Durante as irradiações em campos mistos, em montagens experimentais usando a fonte de AmBe, seção 5.1, o tempo de exposição é de 24hs, e as condições de temperatura e luminosidade nas salas onde ficam as instalações sofrem grandes variações. Devido às dificuldades em controlar esses fatores, as condições de temperatura e luminosidade não foram minimizadas nas irradiações em campos mistos o quanto foram nas irradiações no campo gama puro, porém foram tomados os mesmos cuidados no durante o transporte e armazenamento dos dosímetros.

Neste estudo foi verificado como as condições de temperatura e luminosidade, afetam as respostas dos TLDs e consequentemente contribuem no aumento das incertezas. Sendo verificado que as condições de temperatura afetam os dosímetros de LiF e CaF_2 de forma similar. E a luminosidade afetou apenas os TLDs de CaF_2.

Portanto para uma melhor reprodutibilidade dos dados usando TLD, foi adotado um ciclo de irradiação, tratamento e leitura, mantido um padrão de tratamento térmico e minimizado variações térmicas e incidência de luz (Anexo B).

ANEXO C: INFLUÊNCIA DOS NÊUTRONS NA RESPOSTA LUMINOSA DO TLD-400.

O dosímetro termoluminescente CaF_2: Mn conhecido comercialmente como TLD-400 é comumente usado para dosimetria gama. Por ser pouco sensível a nêutrons este também pode ser usado em um campo misto, gama e nêutron, para monitorar a componente gama. Nesta etapa do trabalho foi avaliada a influência dos nêutrons na resposta do TLD-400 em um campo misto.

Para avaliar a influência dos nêutrons na resposta luminosa do TLD-400, estes foram irradiados em um campo misto em duas condições diferentes. Na primeira condição os nêutrons térmicos são maximizados usando material moderador, água, ao redor da fonte de AmBe. Na segunda condição foi adicionada redor da fonte de AmBe, uma folha de cádmio de 0,5 mm de espessura e 110 mm de altura, visando minimizar o fluxo de nêutrons térmicos. O irradiador utilizado está descrito na seção 5.1, e o posicionamento da folha e cádmio e dos suportes estão ilustrados na Figura 61.

.

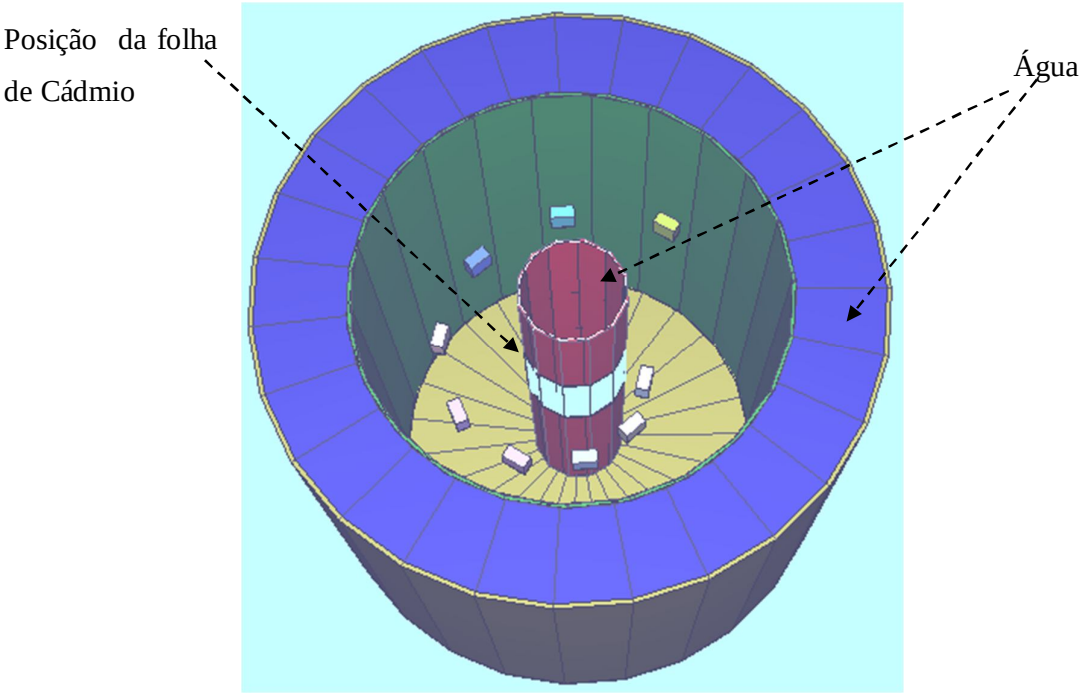

Figura 61. Desenho esquemático do posicionamento da folha de cádmio de dos TLDs. Figura obtida com o programa Vised.

Os dosímetros foram irradiados com e sem a folha de Cádmio de 0,5 mm de espessura, posicionada na altura média da fonte.

Foi utilizado o MCNP5 para avaliar o efeito do cádmio nas características do campo que está sendo obtido. A Figura 62 apresenta a variação do fluxo de nêutrons térmicos ao longo das posições de irradiação, para duas condições de irradiação, ou seja, com e sem o cádmio.

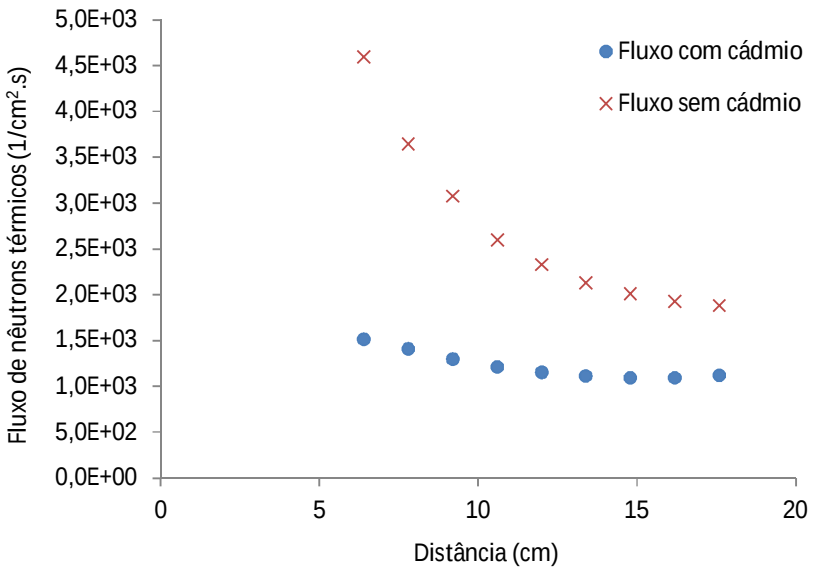

Figura 62. Influência do cádmio no fluxo de nêutrons térmicos incidente no TLD-400.

O fluxo de nêutrons rápidos e epitérmicos não são apresentados por estes não sofrerem variação comparando as duas condições de irradiação.

A partir das simulações com MCNP5, considerando a fonte de AmBe como uma fonte monoenergética de raios gama de 4,4 MeV (seção 4.6.2), foi verificado que a dose depositada por fótons no TLD-400 não sofreu redução mensurável, comparado as duas condições de irradiação. Foi verificado ainda que, da dose total depositada no TLD-400, em média 25% da dose depositada é contribuição dos nêutrons. Da dose total devido aos nêutrons, 99% da dose é contribuição dos nêutrons rápidos.

Levando em consideração o espectro de emissão da fonte de AmBe, Figura 11, a seção de choque do Cádmio,

Figura 2. Pode-se supor que a adição da folha de cádmio ao redor da fonte reduziria apenas o fluxo de nêutrons térmicos, estando assim os resultados obtidos pela simulação de acordo com as expectativas.

Por outro lado, se esperava que a adição do cádmio não causa-se mudança significativa na resposta do TLD-400, uma vez que os nêutrons rápidos e o raio gama de 4,4 MeV não sofreram alterações na condição com ou sem a folha de Cádmio. Entretanto, a irradiação dos TLDs 400 na condição com e sem a folha de cádmio apresentaram significativa diferença, Figura 63.

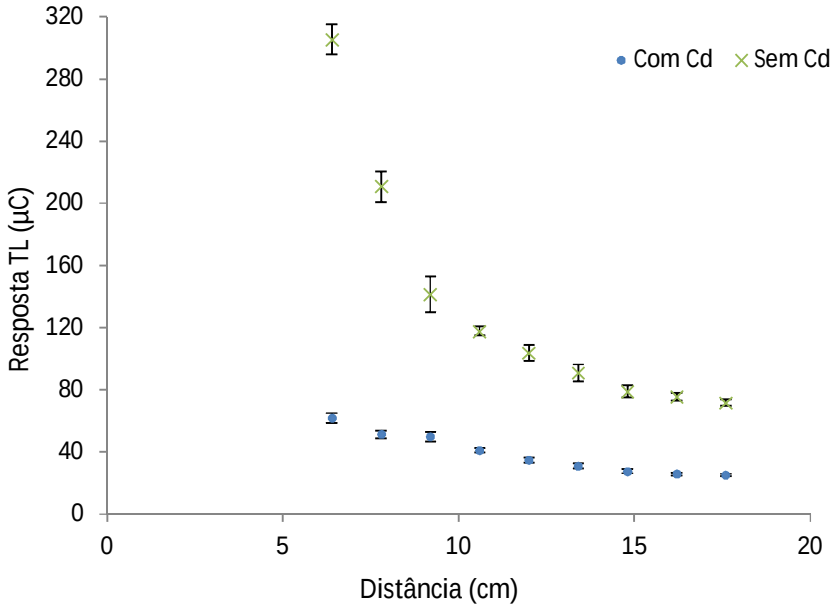

Figura 63. Comparação da resposta média de 3 TLDs 400 para condição com e sem a folha de Cádmio.

O fluxo médio de fótons gerados na interação dos nêutrons com o meio sofre uma redução média de 8% por conta da adição do Cádmio, de acordo com os resultados simulados. Essa observação é mais importante para os dosímetros que estão posicionados mais próximos a fonte, uma vez que os nêutrons rápidos e epitérmicos continuam sendo atenuados nas paredes e no ar no interior do irradiador, e consecutivamente mantendo aproximadamente constante o fluxo de fótons oriundos da interação dos nêutrons térmicos com o meio nas partes mais extrema do irradiador.

A fonte de AmBe é constituída de uma mistura de óxido de Amerício com Berílio metálico encapsulado em aço inoxidável soldado. Entre os fótons emitidos pelo ^{241}Am pode ocorrer a emissão de fótons com 59,5 keV em 35% dos casos.

Considerando que deposição de energia por fótons de menor energia é mais eficiente, pode-se esperar que fótons emitidos pelo ^{241}Am, com energia menor do que os fótons de 4,4 MeV emitidos na reação ^{9}Be (α, n)^{12}C, estejam contribuindo na dose total depositada no TLD-400.

Para verificar o efeito do cádmio sobre fótons de menor energia, visto que a espessura de 0,5mm de Cádmio não atenuou os fótons de 4,4 MeV, foi efetuado o cálculo com o MCNP5 de forma a avaliar a variação da dose depositada por fótons nas duas

condições de irradiação, considerando a fonte de AmBe como uma fonte monoenergética de 59,5 keV.

A Figura 64 apresenta uma comparação no percentual de redução provocado pelo cádmio, na dose calculada para TLD-400 ao longo do irradiador, comparado com a variação da redução percentual da resposta luminosa do TLD-400.

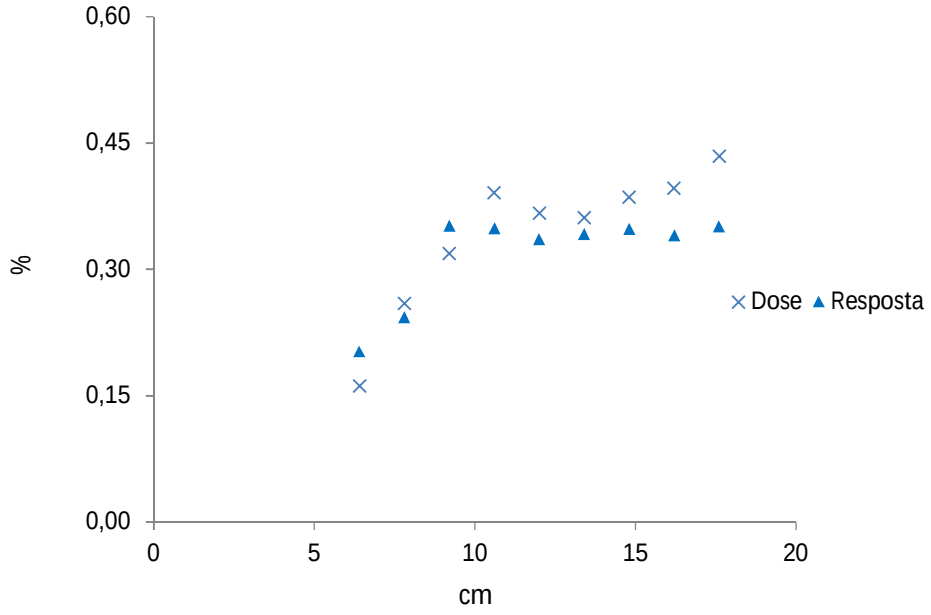

Figura 64. Comparação entre atenuação na dose depositada por fótons (simulado) com a atenuação na resposta do TLD-400, provocado pelo Cádmio.

O comportamento observado da redução na dose simulada, é compatível com o comportamento na redução da resposta TL. Porém, foi observado através de simulações que, da dose total depositada por fótons no TLD-400, os fótons de 59,5 keV contribuem no máximo em 3% da dose. Como o percentual de dose depositada pelos fótons de 59,5 keV é baixo em relação a dose total, não pode ser associada, a taxa de redução na dose depositada por esses fótons com a taxa de redução na resposta do TLD-400.

Portanto para as condições de irradiação aqui citadas, relacionado ao fato do TLD-400 apresentar sensibilidade basicamente aos fótons de 4,4 MeV e nêutrons rápidos, e que nas duas condições de irradiação proposta, esses dois componentes do feixe não sofreram significativas modificações. As variações apresentadas pelos TLDs 400 podem estar associadas a sua alta dependência energética, o que poderia ser verificado simulando algumas faixas de energia dos fótons.

A variação da resposta do TLD-400 pode também estar relacionada com a variação do espectro energético dos nêutrons, ou seja, embora o TLD-400 responda praticamente a raios gama, sua resposta luminosa pode ser modificada variando apenas a energia dos nêutrons no campo misto gama nêutron.

Portanto o uso do TLD-400 para dosimetria gama em campo misto depende de melhor entendimento da variação de sua resposta com a variação do espectro energético do campo, não sendo indicado seu uso para dosimetria gama em campos mistos.

ANEXO D: COMPARAÇÃO DA CURVA DOSE E RESPOSTA DO IRRADIADOR 02, COM AS DIFERENTES CURVAS OBTIDAS NO IRRADIADOR 03.

Usualmente, na técnica de dosimetria em campo misto utilizando TLD, usam-se os pares de dosímetros com sensibilidades diferentes para as componentes do campo. A resposta de dose devido a nêutrons é obtida subtraindo a resposta da primeira região de interesse dos dosímetros.

Para obter a dose de nêutrons, foi subtraído da resposta da primeira região de interesse (ROI-1) do TLD-100, a resposta da primeira região de interesse (ROI-1) do TLD-700. A partir desses valores foi construída a curva de Dose e Resposta, para o irradiador 02, apresentado na seção 4.7.2, comparada a do irradiador 03, apresentado na seção 5.1. A Figura 65 apresenta uma comparação entre as curvas de calibração obtidas a partir da subtração das respostas do ROI-1 do TLD-100.

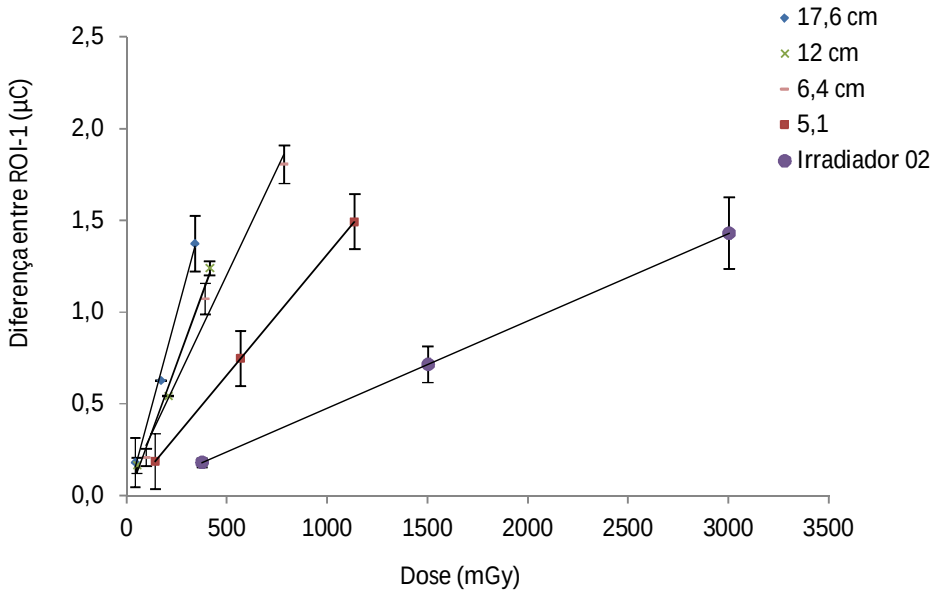

Figura 65. Comparação entre as curvas de calibração para nêutrons, obtidas no Irradiador 02 e 03.

Estão apresentadas quatro curvas para quatro posições no irradiador 03 e uma curva para o irradiador 02. Como os valores de dose apresentados aqui estão na faixa de linearidade dos TLDs, no caso do irradiador 2, os valores das respostas luminosas para 6

e 48 horas, foram obtidos utilizando como referência, a resposta média de quatro irradiações de 24 horas (seção 5.3). As doses foram calculadas com o MCNP5.

Dentre os objetivos desse trabalho, busca-se estabelecer uma relação entre a razão das duas regiões de interesse dos TLDs de LiF e o espectro energético do campo misto.

A Tabela-12 apresenta a razão entre as duas regiões de interesse dos TLDs de LiF, que foram irradiados no irradiador 03 nas mesmas posições apresentadas na Figura 65.

Tabela-12. Razão entre as duas regiões de interesse para os TLDs de LiF em quatro distancias no irradiador 03.

Posição	**5,1 cm**	**6,4 cm**	**12 cm**	**17,6 cm**
TLD-100 (ROI-2/ROI-1)	0,19 ± 0,08	0,25 ± 0,01	0,31 ± 0,01	0,40 ± 0,01
TLD-700 (ROI-2/ROI-1)	0,07 ± 0,08	0,08 ± 0,01	0,10 ± 0,01	0,12 ± 0,05

O irradiador 02 apresenta uma razão entre as duas regiões de interesse para o TLD-100 de 0,18 ± 0,01 e para o TLD-700 de 0,07 ± 0,01.

Entre as curvas de calibração apresentadas na Figura 65, a que apresenta o valor próximo para relação ROI-2/ROI-1 de acordo com os valores apresentados na Tabela-12 é a obtida na posição 5,1 cm.

A Tabela-13 apresenta a resposta luminosa obtida para irradiações de 24hs no irradiador 02 e na posição 5,1cm no irradiador 03.

Tabela-13. Repostas luminosas para as duas regiões de interesse (ROI), para 24hs de irradiação nos irradiadores 02 e 03.

RESPOSTA TL PARA 24hs DE IRRADIAÇÃO				
	TLD-100		TLD-700	
IRRADIADOR	ROI1 (μC)	ROI 2 (μC)	ROI1 (μC)	ROI 2 (μC)
02	4,66 ± 0,01	0,85 ± 0,01	3,93± 0,01	0,28 ± 0,02
03	6,11 ± 0,08	1,18 ± 0,07	5,36± 0,10	0,40 ± 0,03

Foi calculado com o MCNP-5, nas duas condições de irradiação, o fluxo de nêutrons e fótons para verificar se a razão ROI-2/ROI-1 indica o mesmo espectro energético.

Tabela- 14. Fluxo médio calculado nos TLDs de LiF nas relativas posições no irradiador 02 e na posição 5,1 cm do irradiador 03.

IRRADIADOR	**Fluxo de nêutron térmicos (1/cm²)**	**Fluxo gama (1/cm²)**
02	1,27E+04 ± 0,01	7,53E+04 ± 0,01
03	0,55E+04 ± 0,01	2,09E+04 ± 0,004

Embora os valores das razões entre ROI-2/ROI-1 nos TLDs de LiF sejam similares para as duas condições apresentadas na Tabela-13, os valores calculados para o fluxo de nêutrons térmicos no irradiador 02 é aproximadamente 60% maior que o fluxo calculado para o irradiador 03. O fluxo gama calculado para o irradiador 03 é equivalente a ¼ do valor estimado para o irradiador 02.

Comparado os valores das respostas dos TLDs apresentados na Tabela-13 com os fluxos calculados, Tabela- 14, observa-se que embora nas condições de irradiação do irradiador 02 se tenha um maior fluxo de gama e de nêutrons térmicos, as respostas TL obtidas no irradiador 03 são maiores.

Para as condições aqui apresentadas, comparando as curvas de calibração com a razão entre ROI-2/ROI-1 similar, verificou-se que as duas curvas não são equivalentes, apesar da proximidade no valor da razão entre as duas regiões de interesse.

ANEXO E: DADOS OBTIDOS NA IRRADIAÇÃO DOS TLDS NA INSTALAÇÃO DE BNCT.

Os TLDs foram irradiados na instalação de BNCT, que está instalada em um dos extratores de feixe do Reator IEA-R1/IPEN, com o reator operando em duas condições de potência diferentes, 100 kW e 4,5 MW. As irradiações foram feitas usando o suporte de acrílico utilizado nas irradiações no Irradiador 03.

Em cada suporte foram posicionados nove TLDs sendo três de cada tipo. Para a irradiação em 100 kW foram irradiados dois suportes em cada período apresentado na tabela XXX, portanto os valores apresentados são referentes a média de seis TLDs em uma irradiação. Na irradiação em 4,5 MW foi irradiado apenas um suporte para cada período apresentado na tabela 13, portanto os valores são referentes a média de três TLDs. A seguir são apresentadas as respostas TL dos três tipos de TLDs irradiados na instalação de BNCT.

Tabela 15. Resposta média de seis TLDs em uma irradiação na instalação de BNCT. Potência de operação do reator, 100 kW

Tempo	**TLD-100**		**TLD-700**		**TLD-400**
(min)	**ROI-1(µC)**	**ROI-2(µC)**	**ROI-1(µC)**	**ROI-2(µC)**	**ROI-3(µC)**
5	7,35 (0,69)	4,23 (0,48)	0,41 (0,50)	0,07 (0,01)	4,84 (1,07)
10	16,8 (1,8)	8,77 (0,57)	0,92 (0,19)	0,10 (0,01)	9,53 (1,61)
22	35,34 (2,97)	20,31 (1,75)	1,74 (0,53)	0,35 (0,025)	21,80 (4,08)

Tabela 16. Resposta média de três TLDs em uma irradiação na instalação de BNCT. Potência de operação do reator, 4,5 MW

Tempo	**TLD-100**		**TLD-700**		**TLD-400**
(min)	**ROI-1(µC)**	**ROI-2(µC)**	**ROI-1(µC)**	**ROI-2(µC)**	**ROI-3(µC)**
3	345,27 (14,59)	248,40 (9,18)	25,45 (3,31)	2,18 (0,17)	283,27 (52,96)
6	754,90 (26,65)	555,13 (20,54)	43,41 (7,59)	4,21 (0,76)	369,27 (72,29)
12	1441,33 (132,22)	1557,67 (133,28)	85,99 (2,91)	9,11 (0,17)	1487,33 (29,87)

ANEXO F: COMPARAÇÃO DAS RESPOSTAS DOS TLDS 100, TLD-400, TLD 600 E TLD-700 QUANDO IRRADIADOS EM UM MESMO CAMPO MISTO GAMA E NÊUTRON.

Para a caracterização do feixe de radiação na instalação de BNCT/IPEN, está em desenvolvimento uma metodologia usando dosímetros termoluminescentes, TLD [4]. Estes TLDs são utilizados aos pares, por possuírem sensibilidades distintas a um dos componentes do feixe, nêutrons térmicos, em virtude das diferenças na concentração dos isótopos de Lítio. A avaliação aqui proposta contribuirá para analise da metodologia alternativa, usando o par TLD-700 e TLD-100 em substituição ao par TLD-700 e TLD 600 então utilizados. Embora o TLD-100 também contenha o ^{6}Li, sua a concentração é menor, sendo suficiente para a baixo fluxo conseguido com a fonte de AmBe, e retardando a perda da linearidade em alto fluxo na instalação de BNCT.

Os TLDs foram irradiados no irradiador 02, que utiliza um cilindro de polietileno e uma fonte de ^{241}AmBe de 3Ci, apresentado na seção 4.7.2.

Nesse arranjo os TLDs foram posicionados com um suporte de isopor na superfície do cilindro de polietileno na altura media. A fonte de ^{241}AmBe foi posicionada no interior do cilindro de polietileno na altura média.

Os dados obtidos são referentes a quatro irradiações de 24hs. A Tabela-17 apresenta a média das respostas de 30 TLDs de cada tipo, para quatro irradiações

Tabela-17. Resposta média de 30 TLDs para quatro irradiações no campo misto gama e nêutrons.

TLD-100		TLD 600		TLD-700		TLD-400
ROI 1 µC	ROI 2 µC	ROI 1 µC	ROI 2 µC	ROI 1 µC	ROI 2 µC	ROI 3 µC
4,65 ± 0,01	0,85± 0,01	9,89 ± 0,49	2.33 ± 0,14	3.94 ± 0,02	0.28 ± 0,03	340,59 ± 28,88

Os TLDs de LiF apresentam respostas distintas, sendo que, o TLD 600 apresentou a maior resposta nas duas regiões de interesse, devido a maior concentração de ^{6}Li . O TLD-700 por ter a menor concentração de ^{6}Li, apresentou a menor resposta nas duas regiões de interesse. Como os TLDs de LiF tem diferentes concentrações de ^{6}Li se esperava que sua respostas para um campo misto gama e nêutron variassem em função da concentração de ^{6}Li.

Visto o TLD-400 ser pouco sensível a nêutrons sua alta resposta serve como parâmetro indicativo do fluxo de gama.

Foi estimada contribuição dos nêutrons e dos fótons na composição da dose total depositada nos TLDs. A Tabela-18 apresenta os valores obtidos por cálculo com o MCNP5.

Tabela-18. Fração da dose absorvida em relação à dose total depositada em cada tipo de TLD.

Partícula	TLD-100	TLD 600	TLD-700	TLD-400
Fótons	4.68 %	0.79 %	79.3 %	83.7 %
Nêutrons	95.32 %	99.21 %	20.7 %	16.3 %

Os resultados apresentados na Tabela-18 mostram que o TLD 600 é o mais sensível a nêutrons entre os TLDs tipo LiF. Entre os TLDs de LiF o TLD-700 tem a maior sensibilidade a fótons, porém 20,7% da dose depositada neste tipo de TLD é devido aos nêutrons.

Em dosimetria de campos mistos usando TLDs o valor da dose devido a nêutrons é obtido subtraindo o valor da resposta do TLD-700 do valor da resposta de outro TLD com sensibilidade distinta, por exemplo, TLD-100 ou TLD 600. O emprego dessa metodologia sem levar em conta a contribuição dos nêutrons na resposta do TLD-700 pode implicar em uma subestimação na dosimetria dos nêutrons.

O TLD-400 apresentou a maior sensibilidade a fóton e a menor sensibilidade a nêutrons.

A Tabela-19 apresenta a contribuição percentual dos nêutrons térmicos, epitérmicos e rápidos na dose total de nêutrons.

Tabela-19. Porcentagem de cada faixa de energia, na contribuição na dose total de nêutrons.

Energia	TLD-100	TLD 600	TLD-700	TLD-400
Térmico %	94.34	91.50	86.35	0.07
Epitérmico %	3.83	7.80	3.17	0.05
Rápido %	1.84	0.70	10.49	99.89

Os resultados apresentados na Tabela-19 mostram que os TLDs de LiF são mais sensíveis aos nêutrons na faixa térmica, isso devido ao ^{6}Li ter maior seção de choque

para nêutrons térmicos [25]. Estes resultados estão em harmonia com a Tabela-17 onde observa-se que os TLDs de LiF com maior concentração de ^{6}Li tem maior resposta para o campo misto gama e nêutrons térmicos.

Com base no cálculo da composição da dose no TLD-400, pode-se verificar que o TLD-400 é sensível a gama e nêutrons rápidos, sendo que as doses devido a nêutrons térmicos e epitérmicos somados não chegam a 0,5% neste tipo de TLD.

Este estudo contribuiu para o entendimento da composição da dose em cada tipo de TLD. Sendo verificado que cada tipo de TLD tem uma sensibilidade distinta para fótons e nêutrons nas três faixas de energia considerada.

A monitoração em campo misto usando TLD pode ser feita usando o par TLD-700 e TLD 600 ou o par TLD-700 e TLD-100. Para um campo misto de baixo fluxo, como o obtido da fonte de ^{241}AmBe nesse trabalho, o par de TLD-700 e TLD 600 pode ser mais adequado devido ao TLD 600 ser mais sensível a nêutrons do que o TLD-100. Para um campo misto com alto fluxo de nêutrons térmicos, como os obtidos na instalação de BNCT, o par TLD-700 e TLD-100 pode ser mais adequado pelo fato do TLD-100 apresentar a perda da linearidade menos rapidamente do que o TLD-700 [39].

Anexo G: Estimativa de dose nêutron usando apenas a segunda região de interesse do TLD-100.

Ao irradiar o TLD-700 e o TLD-100 no campo gama puro ambos apresentaram uma resposta TL próximas. Sendo que os picos dosimétricos mais pronunciados se encontram na primeira região de interesse (ROI-1), para irradiações em campos gama puro, Figura 8. Quando esses TLDs são irradiados em campos mistos gamas e nêutrons os picos obtidos se encontram na primeira (ROI-1) e segunda (ROI-2) região de interesse, portanto a curva termoluminescente possui duas regiões com respostas predominante, Figura 9.

Para intensidade do campo obtida no irradiador 03, o TLD-100 apresentou uma maior resposta TL para segunda região de interesse em comparação ao TLD-700. Os pontos apresentados na Figura são referentes à média de três TLDs em três irradiações de 24h.

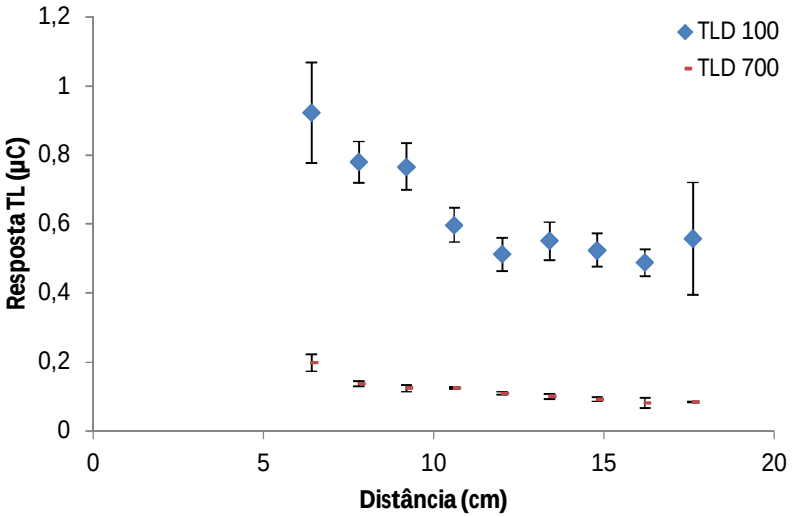

Figura 66. Resposta média de três TLDs em três irradiações no irradiador 03.

A intensidade da resposta TL obtida com o TLD-700 ao longo do irradiador a partir da segunda posição é muito baixa, estando próximas ao valor do ruído eletrônico (0,05 µC). Os resultados obtidos com o TLD-100 podem ser associados a variação do fluxo de nêutrons térmicos calculados com o MCNP-5, 5%, conforme apresentados na seção 5.4, porém a partir do quarto ponto observa-se uma menor variação na intensidade da resposta TL, ou seja a partir desse ponto os valores são muito próximos entre si.

Cada ponto obtido na Figura 66 esta sob um espectro energético diferente, ou seja, campos diferentes. Usando a diferença entre o ROI-1 do TLD-100 e do TLD-700 foi possível obter curvas de calibração com boa distinção para cada campo, Figura 48.

Portanto foi verificado que para campos com espectros diferentes se obtém curvas de calibração diferente.

Usando o ROI-2 do TLD-100 não se obteve com boa distinção curvas de calibração diferentes para os espectros de nêutrons diferentes obtidos no irradiador 03. Assim foi ajustado uma reta média entre os pontos obtidos. A Figura 67 apresenta a curva de calibração obtidas no irradiador 03, a partir da resposta da segundo região de interesse do TLD-100 e da estimativa de dose no TLD, calculadas com o MCNP-5.

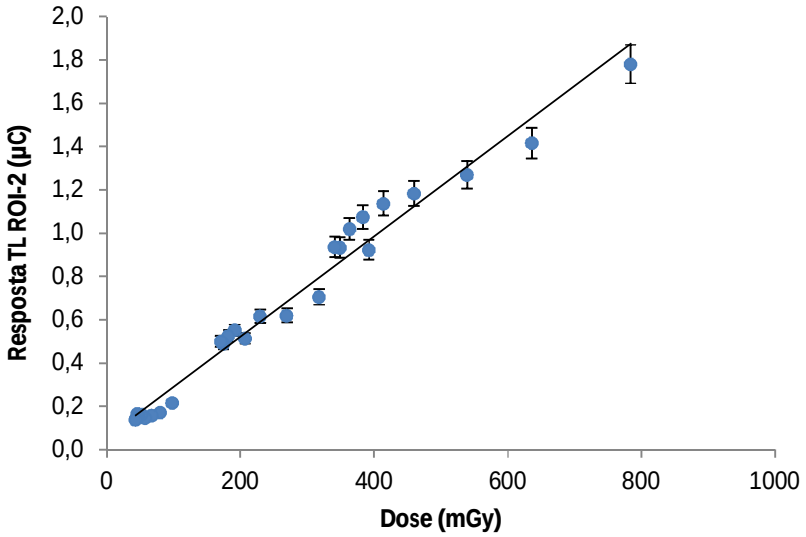

Figura 67. Curva de calibração para o ROI-2 do TLD-100 obtida no irradiador 03.

Os parâmetros da função ajustada foi:

$$y = A + B.x$$

Tabela 20. Parâmetros da calibração linear do ROI-2, TLD-100.

Parâmetro	Valor
A	(0,059 ± 0,022) µC
B	(0,0023 ± 0,0001) µC/mGy
R^2	0,978

A partir da curva obtida foi estimada a taxa de dose de nêutrons no TLD-100 para irradiações feitas na instalação de BNCT no reator IEA-R1. O valor para irradiação com o reator operando na potência de 4,5 MW foi de 2,95± 0,15 kGy/h . E para potência de 100kW foi de 38,9 ± 1,9 Gy/h.

Os valores obtidos com a curva calibrada para o ROI-2 do TLD-100 são idênticos aos valores estimados com uma das curvas de calibração, obtida a partir da diferença de resposta do TLD-100 e TLD-700, na primeira posição de irradiação do irradiador 03.

A identidade nesses valores aponta a possibilidade de se fazer dosimetria nêutron usando apenas um único dosímetro para estimativa de dose nêutrons na instalação de BNCT.